



Michaela SUPPA

**L'UTILIZZO DI CALCESTRUZZO PROVENIENTE DA
DEMOLIZIONE DI EDIFICI SOTTOPOSTI AD INCENDIO
NELLA REALIZZAZIONE DI INFRASTRUTTURE E
SOTTOFONDI STRADALI**

*Tesi di Dottorato
XXVI ciclo*

*Il Coordinatore
Prof. Ing. Luciano ROSATI*

*Il Tutor
Prof. Ing. Maurizio NICOLELLA*

ATMOSPHERIC CORROSION AND DURABILITY DESIGN OF METAL STRUCTURES

Copyright © 2008 Università degli Studi di Napoli Federico II – P.le Tecchio 80, 80136 Napoli, Italy –
web: www.unina.it

Proprietà letteraria, tutti i diritti riservati. La struttura ed il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magnetico-ottico, ottico, cartaceo, etc.).

Benché l'autore abbia curato con la massima attenzione la preparazione del presente volume, Egli declina ogni responsabilità per possibili errori ed omissioni, nonché per eventuali danni dall'uso delle informazione ivi contenute.

INDICE GENERALE

SOMMARIO

RINGRAZIAMENTI

NOTE SULL'AUTORE

PARTE I – EFFETTI DEGLI INCENDI SULLE OPERE CIVILI IN CEMENTO ARMATO

CAPITOLO 1. Generalità sugli incendi	1
1.1 Altre definizioni di incendio	6
1.2 Le principali cause di incendio	6
1.3 cenni di trasmissione del calore	10
1.4 Incendi in edifici (ISO-834)	13
1.5 Breve analisi degli incendi in altre strutture: le grandi opere	15
1.6 Temperature d'incendio in edilizia	22
CAPITOLO 2. Dati statici dell'andamento degli incendi in Italia e in Campania	27

PARTE II – FASE SPERIMENTALE

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato	37
3.1 Cause di degrado del calcestruzzo armato	37
3.2.Degrado dell'acciaio: la corrosione	49
3.3 Classi di esposizione	50
CAPITOLO 4. Il comportamento al fuoco del calcestruzzo	53
4.1 Trasformazioni chimico-fisiche del materiale	54
4.2 Classificazione degli inerti	62

4.3. Effetto delle alte temperature sul calcestruzzo	63
4.4 Effetto delle alte temperature sull'acciaio	76
4.5 Effetto delle alte temperature sul calcestruzzo armato	79
CAPITOLO 5. Lo spacco esplosivo (explosive spalling)	85
5.1 Processi fisici	86
5.2 Cause e fattori che influenzano lo spalling	87
5.3 Fenomeni di trasporto di vapore all'interno del materiale	88
CAPITOLO 6. Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature	91
6.1 I parametri scelti nella sperimentazione	91
6.2 Forma, dimensione ed altri requisiti per provini e per casseformi	93
6.3 Temperature di riferimento e determinazione del numero di provini da confezionare	95
6.4 Caratteristiche dei materiali utilizzati	96
6.5 Il programma di prova	108
6.6 Materiali e metodi	125

PARTE III – ANALISI DELLE PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELLE OPERE STRADALI

CAPITOLO 7. Le pavimentazioni stradali: funzionalità e composizione

7.1 Cenni sulla progettazione stradale	143
--	-----

PARTE IV – LA NORMATIVA DI SETTORE

CAPITOLO 8. Normativa nel settore delle costruzioni stradali

8.1 Norme tecniche	147
--------------------	-----

8.2 La legislazione in Italia	160
-------------------------------	-----

PARTE V IL RICICLAGGIO NELLA REALIZZAZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

CAPITOLO 9. Considerazioni generali sul riciclaggio 151

9.1 Il riciclaggio nel settore stradale	168
---	-----

CAPITOLO 10. Tecniche di riciclaggio 171

10.1 Riciclaggio a caldo in impianto	171
--------------------------------------	-----

10.2 - Riciclaggio a freddo in situ	178
-------------------------------------	-----

10.3 - Riciclaggio in Profondità	182
----------------------------------	-----

10.4 - Riciclaggio Superficiale	182
---------------------------------	-----

10.5 - Miglioramento delle Strade non Asfaltate	182
---	-----

10.6 - Sostanze stabilizzanti	183
-------------------------------	-----

10.7 - Sostanze stabilizzanti cementizie	184
--	-----

10.8 - Sostanze stabilizzanti bituminose	185
--	-----

10.9 processo di stabilizzazione con emulsione bituminosa	186
---	-----

10.10 - Processo di stabilizzazione con emulsione bituminosa	188
--	-----

10.11 - Le materie prime riciclate per la realizzazione di sottofondi stradali ed emulsioni bituminose	189
--	-----

10.12 - Qualità delle materie prime secondarie	195
--	-----

PARTE VI CONCLUSIONI

CAPITOLO 11. Risultati e conclusioni 199

11.1 Colorazione assunta dai provini esposti alle diverse temperature	
---	--

11.2 Calcolo del peso specifico dopo il trattamento termico	203
11.3 Calcolo della velocità, mediante prova ad ultrasuoni, dopo il trattamento termico	205
11.4 Calcolo dell'indice di rimbalzo, mediante prova sclerometrica, dopo il trattamento termico	207
11.5 Calcolo della resistenza a compressione mediante prova di schiacciamento	209
11.6 Calcolo della resistenza a compressione mediante metodo sonreb	213
11.7 Valutazione del degrado attraverso decomposizione chimica	221
11.8 CONCLUSIONI	224

Bibliografia

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo nuovo percorso, difficile ma stimolante, desidero ringraziare: il mio tutor prof. ing. Maurizio Nicolella, il prof. ing. Pasquale Petrella, che mi ha seguito nella fase iniziale del mio percorso di dottorato e il coordinatore della scuola prof. ing. Luciano Rosati. A tutti loro va la mia gratitudine per avermi sostenuta nel difficile obiettivo di riprendere gli studi accademici, dopo tanti anni dalla laurea, non solo con il loro supporto scientifico ma soprattutto con la loro grande empatia.

Ringrazio poi la mia nipotina Giuliana Gaia che, inconsapevolmente, mi ha aiutata con il suo entusiasmo di bambina e il suo grande amore; un entusiasmo così contagioso da rendere le persone che le sono vicine capaci di vivere la vita come quell'esperienza meravigliosa, in cui, se vogliamo, ogni giorno possiamo riuscire ad essere migliori.

ABOUT THE AUTHOR

Michaela Suppa si è laureata nel 1997 in ingegneria civile sez. edile, vecchio ordinamento. Da allora ha svolto attività come libero-professionista, occupandosi in particolare di gestione del cantiere, progettazione antincendio e problematiche ambientali. Nel 2006, in qualità di vincitrice di concorso, ha svolto attività, prima presso la Direzione Regionale di Milano e poi presso la Direzione Tecnica di Grosseto, come funzionario tecnico del Ministero del Lavoro, con il ruolo di Ispettore Tecnico e Ufficiale di Polizia Giudiziaria. Nel 2014, dimessasi dall'incarico di funzionario, ha ripreso totalmente la sua attività di libero professionista.

Nel 2007 ha conseguito il Master di II livello in ingegneria ambientale presso l'Università di Napoli Federico II.

Durante gli anni post-laurea ha sempre svolto aggiornamenti professionali e, nell'ambito delle materie di cui si è professionalmente occupata, ha partecipato a numerosi convegni scientifici e comitati tecnico-scientifici, anche in qualità di membro del Consiglio dell'Ordine degli Ingegneri, ruolo che ricopre dal 2001.

PARTE I – Effetti degli incendi sulle opere civili in cemento armato

CAPITOLO 1– Generalità sugli incendi

L'**incendio** è una reazione non controllata che si sviluppa senza limitazioni nello spazio e nel tempo dando luogo, dove si estende, a calore, fumo, gas e luce. Tale evento rappresenta una delle condizioni più severe a cui un sistema strutturale può essere soggetto durante la sua vita utile ed è per questo su di esso vengono impostate anche le ipotesi progettuali e le verifiche finali.

L'incendio viene di solito distinto in tre fasi:

1. fase iniziale o di accensione
2. fase di incendio vero e proprio o a velocità di combustione costante
3. fase di estinzione o raffreddamento

La prima fase va dal primo apparire della fiamma al così detto flashover o infiammazione generalizzata; la seconda dal flashover al punto in cui la temperatura media raggiunge il suo valore massimo; la terza fase va dal punto di temperatura massima fino all'estinzione totale. La fase di estinzione si ritiene completata quando la temperatura media raggiunge circa i 300°C.

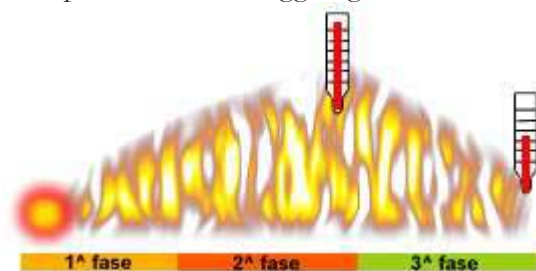


Figura 1-1 - Schema delle fasi di un incendio

La fase iniziale di un incendio corrisponde ad un regime di grande instabilità.

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

Le circostanze che influenzano l'ulteriore sviluppo di un incendio sono aleatorie: per esempio la rottura dei vetri delle finestre che avviene intorno ai 100°C, la natura e la disposizione dei vari mobili o la natura dei rivestimenti. La propagazione del fuoco da una zona all'altra avviene, specie all'inizio, per irraggiamento e convezione.

Durante questa fase le temperature sono molto differenti da punto a punto e subiscono rapide ed importanti oscillazioni. La temperatura media cresce abbastanza rapidamente e le differenze di temperature da punto a punto tendono a divenire sempre più piccole.

La prima fase è molto importante per l'ulteriore sviluppo del fuoco o per la sua eventuale autoestinzione e può essere suddivisa in vari stadi:

1° stadio (inizio di ignizione)

Tale stadio dipende dai seguenti fattori:

- infiammabilità del combustibile
- possibilità di propagazione della fiamma
- grado di partecipazione al fuoco del combustibile
- geometria e volume degli ambienti
- possibilità di dispersione del calore nel combustibile
- ventilazione dell'ambiente
- caratteristiche superficiali del combustibile.

Questo stadio inizia allorché un oggetto combustibile viene posto a contatto stretto con una sorgente di calore anche modesta (piccola estensione, bassa emissione di calore, breve tempo).

Un fattore importante risulta essere il grado di infiammabilità dei materiali combustibili. Perché l'oggetto combustibile si accenda è necessario che, oltre ad essere molto vicino alla sorgente, sia in grado di svolgere un notevole volume di gas e vapori infiammabili in tempi relativamente brevi. Se tutto ciò non avviene la sorgente termica si esaurisce prima che si verifichi l'ignizione.

In generale l'ossigeno disponibile è sovrabbondante per le modeste e limitate reazioni che si verificano inizialmente e quindi il progredire di questa fase raramente è controllato dalla quantità d'aria disponibile.

2° Stadio (di propagazione)

Tale stadio è caratterizzato da:

- produzione di gas tossici e corrosivi
- riduzione della visibilità a causa dei fumi di combustione

- aumento della partecipazione alla combustione dei combustibili solidi e liquidi
- aumento rapido delle temperature
- aumento delle energie di irraggiamento.
- In questo stadio vengono coinvolti altri oggetti combustibili (mobili, rivestimenti di pareti ecc.).

Il progredire dell'incendio dipende dalle caratteristiche di infiammabilità dei materiali.

La continuazione della combustione dipende dalla natura dello strato prossimo a quello superficiale e dalla sua inerzia termica (conduttività e dalla capacità termica).

Se il calore fornito non è sufficiente ad innalzare la temperatura della parte di materiale combustibile adiacente non ancora coinvolta nell'incendio si può verificare una graduale estinzione.

Se invece il bilancio è positivo allora la combustione continuerà ad una velocità sempre maggiore; la temperatura ambiente aumenterà con conseguente aumento della velocità di combustione.

Inoltre nel caso la ventilazione sia insufficiente, la quantità di ossigeno si riduce, determinando una combustione incompleta, una diminuzione della temperatura e un rallentamento della velocità.

Il progredire dell'incendio è generalmente **irregolare**; viene facilitato dalla rottura dei vetri delle finestre ed ostacolato, fino ad una possibile autoestinzione, da deficienza di ossigeno o da una insufficiente esposizione degli oggetti circostanti la cui temperatura può non raggiungere quella di ignizione.

3°Stadio (dalla propagazione al flashover)

Tale stadio è caratterizzato da:

1. brusco incremento della temperatura
2. crescita esponenziale della velocità di combustione
3. forte aumento di emissione di gas e di particelle incandescenti

i combustibili vicino al focolaio sono soggetti ad autoaccensione, quelli più lontani si riscaldano fino a raggiungere la temperatura di combustione con produzione di gas di distillazione infiammabili.

Questo terzo stadio viene ulteriormente suddiviso in **due parti**.

Stadio 3a - All'inizio l'incendio si propaga ad un oggetto adiacente, le fiamme raggiungono il soffitto dove si accumulano gas e fumi caldi. La

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

temperatura aumenta più rapidamente, ma non raggiunge valori tali da determinare l'ignizione spontanea delle superfici combustibili. Con una adeguata ventilazione, l'incendio prosegue da oggetto a oggetto, mentre le fiamme e i gas caldi irradiano in tutte le direzioni energia termica che colpisce il pavimento e gli oggetti contenuti nel locale. In questo stadio la temperatura ha raggiunto un valore tale per cui risulta molto improbabile l'autoestinzione.

Stadio 3b - Si ha una propagazione rapida dell'incendio, la temperatura media supera i 500°C, la maggior parte del materiale combustibile prende fuoco per effetto del calore che riceve o per irraggiamento o per convezione. Si sviluppano grandi quantità di fumo che fuoriesce dalle finestre o dalle altre aperture. La temperatura aumenta oltre i 600°C e tutti i materiali combustibili esposti emettono gas infiammabili. L'incendio si sviluppa con pieno vigore e le temperature crescono rapidissimamente. E' questo lo stadio chiamato **flashover** o di **infiammazione generalizzata**.

Successivamente se il locale non è sufficientemente ventilato, l'ossigeno disponibile decresce rapidamente e risulta insufficiente per alimentare la combustione completa del combustibile nel locale. Ne segue che i gas infiammabili non combusti fuoriescono dalle finestre, dove, in presenza di altro ossigeno dell'aria, bruciano sulla facciata dell'edificio.

L'incendio vero e proprio inizia nel punto chiamato **flashover**. Esso rappresenta uno **stadio irreversibile** al di là del quale vi è scarsa possibilità che l'incendio si spenga da solo prima che il combustibile sia tutto esaurito.

E' possibile dare almeno due **definizioni** del flashover:

1. punto in cui la temperatura del gas presso il soffitto raggiunge il valore medio di 600°C
2. punto in cui l'intensità del calore raggiunge un valore di convezione e di irraggiamento pari a 1,25 W/cm² che rappresenta il limite inferiore di infiammabilità dei materiali cellulosici.

In ogni caso esso è caratterizzato dall'apparizione quasi simultanea di una serie di fenomeni:

i fuochi determinati dalla combustione dei gas di distillazione o di combustione aumentano di numero e di intensità

le temperature nei diversi punti del locale tendono a diventare uniformi

la combustione al verificarsi del flashover accelera notevolmente e richiede considerevoli volumi di ossigeno.

Il flashover si verifica dopo un tempo che va da 3 ai 30 minuti dall'inizio dell'ignizione e la temperatura media raggiunge i 600°C.

Dopo il flashover inizia la fase **a combustione costante**.

La temperatura media è abbastanza elevata, la quantità di calore in gioco è notevole e i materiali combustibili sviluppano grandi quantità di gas infiammabili.

La **temperatura** nel locale non è uniforme, i pavimenti e le parti inferiori dei muri raggiungono temperature minori di quelle raggiunte dalle parti superiori dei muri o dai soffitti; tuttavia le differenze non sono eccessive e il fenomeno si può ritenere che avvenga alla temperatura di combustione media dei gas.

La **potenza termica** generata dipende dalla velocità di combustione che, a sua volta, dipende dalla portata d'aria entrante e dalla quantità di calore sviluppata dal combustibile nelle condizioni in cui avviene la combustione.

Della potenza termica generata, mediamente, oltre il 60% viene asportata con i gas di scarico, circa il 10% viene irradiato attraverso le finestre verso l'esterno e circa il 30% va ad accumularsi nelle strutture che limitano i locali (muri, pavimenti e soffitti).

La dilatazione dovuta alla temperatura, la conseguente diminuzione di densità del gas di combustione e la differenza di pressione tra esterno ed interno determinano la fuoriuscita dei gas di combustione attraverso le parti alte delle finestre ed il richiamo di aria fresca dall'esterno che penetra nel locale dal basso. La parte bassa del locale risulta quindi in depressione, mentre la parte alta è invece in pressione.

L'ultima delle fasi in cui può scomporsi un incendio è quella di estinzione o di raffreddamento.

In corrispondenza di questa fase la **temperatura**, dopo aver raggiunto il suo valore massimo, comincia a diminuire più o meno rapidamente e ciò in rapporto alla potenza termica ancora sviluppata dalla combustione dei residui dei materiali combustibili (in generale combustione senza fiamma) e quella residua delle strutture che delimitano il locale.

Il **calore** accumulatosi permane per tempi abbastanza lunghi e la sua restituzione avviene in relazione al salto termico fra la temperatura

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

superficiale e quella dei gas all'interno del locale, alle caratteristiche termiche e, infine, alla ventilazione del locale.

Questa terza fase non dovrebbe essere trascurata: il suo effetto è particolarmente importante nella distribuzione della temperatura della facciata compresa tra il piano incendiato e quello soprastante; una notevole potenza termica continua ad essere asportata coi fumi, a disperdersi per irradiazione attraverso le finestre, mentre l'afflusso di aria fresca abbassa notevolmente la temperatura media.

Questa fase termina quando la temperatura raggiunge i 300° circa.

1. 1 – Altre definizioni di incendio

Gli incendi, in funzione della velocità di combustione, possono essere suddivisi in incendi a sviluppo lento oppure a sviluppo rapido, a seconda che nella fase iniziale si abbia una più o meno intensa emissione di calore, di fiamma e di prodotti della combustione. Per quanto riguarda invece il tipo di fuoco si distinguono generalmente due categorie:

- Incendi covanti;
- Incendi aperti.

Per incendio covante si intende un incendio caratterizzato dall'assenza di fiamma e dal fatto che, non essendo in grado di autoalimentarsi, richiede continuo apporto di energia (con eccezione degli incendi covanti incandescenti). Per incendio aperto si intende un incendio che presenta fiamme e che dopo la sua accensione si autoalimenta.

1.2 Le principali cause di incendio

Le principali cause di incendio possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- Deposito o manipolazione non idonea di sostanze infiammabili o combustibili;
- Accumulo di rifiuti, carta o altro materiale combustibile che può essere facilmente incendiato (accidentalmente o deliberatamente);
- Negligenza nell'uso di fiamme libere e di apparecchi generatori di calore;

- Inadeguata pulizia delle aree di lavoro e scarsa manutenzione delle apparecchiature;
- Impianti elettrici o utilizzatori difettosi, sovraccaricati e non adeguatamente protetti;
- Riparazioni o modifiche di impianti elettrici effettuate da persone non qualificate;
- Apparecchiature elettriche lasciate sotto tensione anche quando inutilizzate;
- Utilizzo non corretto di impianti di riscaldamento portatili;
- Ostruire la ventilazione di apparecchi di riscaldamento, macchinari, apparecchiature elettriche e di ufficio;
- Fumare in aree ove è proibito, o non usare il posacenere;
- Negligenze di appaltatori o di addetti alla manutenzione;

Cause di incendio	Numero	Percentuale
Cause elettriche:scintille	923	31,83
Mozziconi di sigaretta	257	8,86
Autocombustione	253	8,14
Faville	178	6,14
Guasti a bruciatori e camini	123	4,25
Dolose	107	3,69
Surriscaldamento di macchine	89	3,06
Fulmini	81	2,79
Esplosioni e scoppi	28	0,98
Altre cause	860	29,66
Totale	2899	100
Cause non accertate	3944	
Totale incendi	6843	

Figura-2 - Probabili cause di incendio

Nelle attività industriali sono state rilevate le seguenti cause di incendi più comuni, rappresentate in grafico:

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

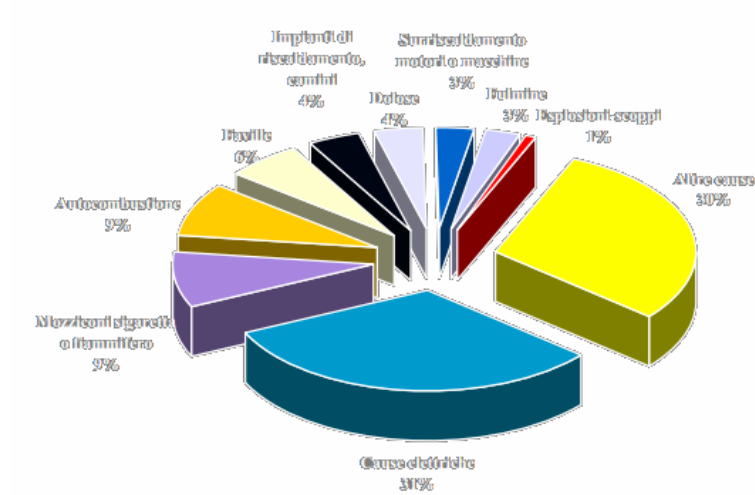


Figura 1-3 - Probabili cause di incendio in ambito industriale

Nelle civili abitazioni, invece le seguenti:



Figura 1-4 - Probabili cause di incendio in ambito civile

Per quanto riguarda la propagazione dell'incendio questa può avvenire per uno o più dei seguenti fenomeni:

- **Convezione:** il calore prodotto da un materiale in fase di incendio si trasmette all'aria circostante, riscaldandola e mettendola in movimento con conseguente trasferimento di calore a superfici e/o oggetti non ancora interessati dal fuoco;
- **Conduzione:** il calore si trasmette dal materiale in combustione alle zone a diretto contatto, propagandosi per via solida;
- **Irraggiamento:** il calore viene trasmesso per mezzo di onde elettromagnetiche emesse dalla zona di combustione che si trova ad alta temperatura cosicché si trasferisce ad altre superfici senza l'intervento di alcun mezzo di trasporto;
- **Per effetto di tizzoni:** durante il suo sviluppo possono essere prodotte scintille e/o particelle incandescenti che, se trasportate da fenomeni di convezione o più semplicemente dal vento, possono favorire la propagazione agli edifici circostanti.

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

1.3 cenni di trasmissione del calore

La comprensione dell'evoluzione dell'incendio, prima schematizzata, necessita la conoscenza dei fenomeni e delle leggi che governano la trasmissione del calore, che avviene mediante i processi di conduzione, convezione e irraggiamento. Di seguito le varie fasi verranno trattate sotto tali aspetti anche al fine di evidenziare le sostanze che possono svilupparsi e le reazioni a cui possono dare seguito.

Conduzione:

La conduzione è il meccanismo di trasmissione tipico dei materiali solidi. In materiali con buona conducibilità termica, il calore è trasmesso attraverso l'interazione degli elettroni liberi, per cui materiali caratterizzati da una buona conducibilità elettrica risultano essere buoni conduttori del calore. Al contrario, nei materiali dotati di cattiva conducibilità termica, il calore è trasmesso attraverso mediante vibrazioni meccaniche del reticolo molecolare; tali materiali sono in genere cattivi conduttori elettrici. La conduzione del calore costituisce un fattore importante per l'accensione di superfici solide e per la resistenza al fuoco di pareti tagliafuoco e di elementi strutturali. Per il calcolo della trasmissione di calore per conduzione è necessario conoscere alcune proprietà del materiale, ossia densità, calore specifico e conducibilità termica. Descriviamo tali proprietà:

Densità ρ , è la massa del materiale per unità di volume (kg/m^3);

Calore specifico c_p , rappresenta la quantità di calore necessaria per riscaldare di un grado l'unità di massa del materiale (J/kg K);

Conducibilità termica k , rappresenta la quantità di calore che passa nell'unità di tempo attraverso un elemento di sezione unitaria, con gradiente termico unitario tra le due sezioni ($\Delta T / \Delta L = 1$) e si misura in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$;

Spesso occorre conoscere due ulteriori proprietà derivate, ossia la diffusività termica, data da $\alpha = k / (\rho c_p)$ e misurata in m^2/s , e l'inerzia termica ρc_p , misurata in $\text{W}^2\text{s}/\text{m}^4\text{K}^2$. Materiali con bassa inerzia termica sottoposti a riscaldamento presentano un rapido aumento della temperatura superficiale, da cui consegue un accensione molto rapida. In regime stazionario, il flusso di calore per area unitaria (W/m^2)

dq''/dt), trasmesso per conduzione, è direttamente proporzionale al gradiente termico tra due punti:

$$\frac{dq''}{dt} = \frac{k dT}{dx}$$

con:

- **k** costante di proporzionalità detta conducibilità termica ($W m^{-1} K$);
- **T** temperatura ($^{\circ}C$ o K);
- **x** distanza nella direzione del flusso del calore (m).

Nel calcolo in regime stazionario il materiale non assorbe calore e quindi non modifica il suo regime termico. Nel caso di campo termico transitorio, quando la temperatura varia nel tempo, si deve tener conto anche della quantità di calore necessaria a modificare la temperatura del materiale. Riferendosi per semplicità ad un caso di trasmissione monodimensionale in assenza di sorgenti o pozzi di calore interni, l'equazione della conduzione assume la seguente forma (Equazione di Fourier):

$$\frac{\partial T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

dove t è il tempo (s) e α è la diffusività termica (m^2/s). Si può osservare come materiali aventi bassa diffusività termica, se esposti a temperature superficiali crescenti in situazione termica transitoria, accumulano meglio calore dei materiali dotati di alta diffusività termica. Tali considerazioni sono applicabili a solidi bi- e tri-dimensionali.

Convezione:

La convezione consiste nella trasmissione del calore attraverso il movimento di fluidi (gas e liquidi) e costituisce un importante fattore nella propagazione delle fiamme e nel trasporto verso l'alto di fumo e

gas caldi, che nei locali chiusi si innalzano verso il soffitto o

fuoriescono dalle finestre. La trasmissione del calore per convezione

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

interviene di solito tra la superficie di un solido e il fluido circostante, che riscalda o raffredda il solido. La velocità di riscaldamento o raffreddamento dipende da diversi fattori, ma soprattutto dalla velocità del fluido lungo la superficie e dalla differenza di temperatura tra i due materiali. In particolare si assume una dipendenza di proporzionalità diretta fra il flusso di calore per area unitaria dq''/dt (W/m^2) ed il suddetto differenziale termico, secondo la seguente legge (Legge di Newton):

$$\frac{dq''}{dt} = h\Delta T$$

dove h è il coefficiente di trasmissione del calore di tipo convettivo (W/m^2K), detto anche coefficiente liminare, e ΔT è la differenza di temperatura tra la superficie del solido e il fluido ($^{\circ}C$ o K). Il valore del coefficiente liminare h è fortemente variabile in funzione di molti fattori, fra i quali le caratteristiche del fluido e della corrente fluida (velocità, densità, comprimibilità, viscosità, caratteristiche a loro volta dipendenti dalla temperatura), la geometria della superficie e lo spessore dello strato limite (dipendente dalla viscosità del fluido). Un valore tipico per elementi strutturali esposti al fuoco è $25 W/m^2K$, ma in testi e normative si possono trovare altri valori.

Irraggiamento:

L'irraggiamento, consistente nella trasmissione di energia mediante onde elettromagnetiche viaggianti attraverso il vuoto oppure attraverso i solidi ed i liquidi trasparenti, è di estrema importanza negli incendi poiché costituisce il principale meccanismo di trasmissione del calore dalle fiamme alla superficie dei materiali combustibili, dal fumo caldo agli oggetti contenuti nel locale e da un edificio che brucia ad un edificio adiacente. La relazione tra il flusso di calore entrante dq''/dt in un punto di una superficie ricevente e la temperatura della superficie emittente detta anche radiante) è espressa dalla seguente legge:

$$\frac{dq''}{dt} = \rho \epsilon_g \sigma T_g^4$$

con:

ρ fattore di configurazione;

- ϵ_e emissività della superficie radiante;
- σ costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/m²/K⁴);
- T_e temperatura assoluta della superficie radiante (K);

Dato che ognuna delle due superfici - ricevente e radiante - assorbe ed irraggia, il flusso di calore risultante dq''/dt dalla superficie radiante più calda a quella ricevente più fredda è dato dalla seguente espressione:

$$\frac{dq''}{dt} = \rho \epsilon \sigma (T_e^4 - T_r^4)$$

dove T_r è la temperatura assoluta della superficie ricevente (K) e ϵ è l'emissività risultante delle due superfici, data dalla seguente espressione:

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_e} + \frac{1}{\epsilon_r} - 1}$$

Con ϵ_r emissività della superficie ricevente. L'emissività ϵ indica l'efficienza della superficie emittente nell'emettere calore radiante, con un valore che va da 0 a 1,0. Nelle situazioni di incendio, la maggior parte delle superfici calde, le particelle di fumo e le fiamme luminose hanno un'emissività compresa tra 0,7 e 1,0. Il fattore di configurazione r da invece una misura di quanto la superficie emittente sia vista da quella ricevente.

1.4 Incendi in edifici (ISO-834)

La curva standard riprodotta con maggior frequenza rappresenta l'incendio ideale di natura cellulosica, provocato ad esempio dalla combustione di materiali quali legno, carta e tessuto. Su di essa è basata la maggior parte delle prove e dei metodi di calcolo deputati alla determinazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali negli edifici. Tale curva fornisce la temperatura del gas in funzione della sola durata di incendio, caratteristica propria della curva stessa. La norma ISO-834 prevede una crescita della temperatura da 20 a 842 °C nell'arco di 30', con una velocità media di riscaldamento dell'ordine di 27,4 °C min⁻¹.

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

Questo profilo di incendio presenta un lento incremento della temperatura fino a 1000 °C, nell'arco temporale di 120'; esso rappresenta solo una singola condizione di esposizione ad un incendio pienamente sviluppato e non include un ramo finale di raffreddamento presente in condizioni reali (la temperatura decresce una volta che la maggior parte del materiale combustibile è stata consumata).

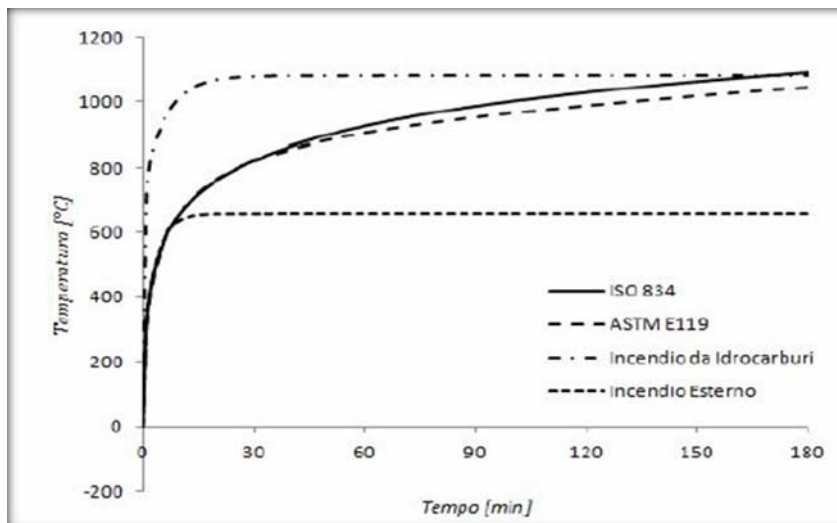


Figura 0-5 - Curve di incendio standard

Gli incendi reali possono tuttavia mostrare una fase di crescita più lenta e il raggiungimento di temperature massime più elevate rispetto alla suddetta normativa; si può quindi dedurre che la curva standard (ISO-834) corrisponde ad un incendio gravoso e non al più gravoso incendio possibile. Inoltre, per quanto concerne fenomeni di rottura influenzati soprattutto dalla velocità di riscaldamento, come lo spacco superficiale nel calcestruzzo armato, la condizione più severa è rappresentata da un rapido sviluppo dell'incendio, a cui conseguono elevate pressioni del vapor d'acqua nei pori ed elevati gradienti termici.

Nella realtà accade frequentemente che la velocità di riscaldamento nella prima fase dell'incendio risulti più alta rispetto a quanto specificato dalla curva standard.

In sostanza, nel caso di incendio che si sviluppa in un edificio, è possibile effettuare l'analisi dei singoli elementi strutturali (travi, pilastri, solai, etc.) facendo riferimento a diverse curve standard, a seconda della normativa presa in considerazione.

In Italia, le NTC 2008 al punto 3.6.1.5.1 recepiscono la norma ISO-834, di cui si riportano l'espressione matematica e grafica, Figura 1.5.1.II, assumendo una temperatura iniziale T_0 di 20 °C.

$$T = 345 \log(8t + 1) + T_0$$

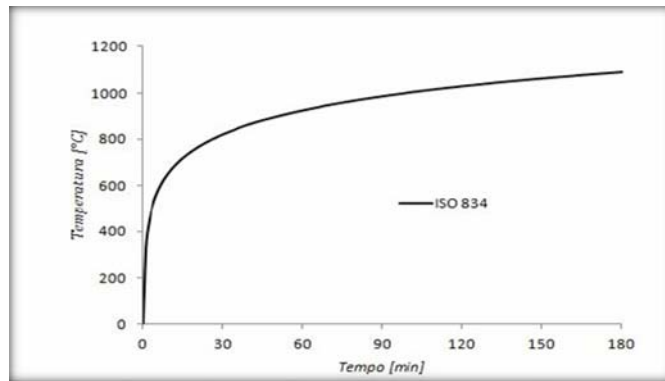


Figura 0-6 - II Curva di incendio standard ISO-834

Tra gli edifici soggetti a pericolo di incendio meritano un'attenzione particolare gli edifici alti, poiché subentrano fattori aggravanti (ad esempio effetto camino, difficoltà di intervento dei vigili del fuoco etc.).



Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

Figura 0-7 - Incendi in edifici alti: (a) incendio della First Interstate Bank, Los Angeles, 1988; (b) danni causati dall'incendio al Parque Central, Caracas, 2004

1.5 Breve analisi degli incendi in altre strutture: le grandi opere

STRUTTURE MARINE ED IMPIANTI PETROLCHIMICI

Negli anni '70, la compagnia petrolifera Mobil ha investigato sugli incidenti provocati dalla combustione degli idrocarburi ed ha sviluppato un profilo temperatura tempo che presenta una rapida crescita di temperatura nei primi 5 min dell'incendio fino a 900 °C (con una velocità di riscaldamento di 176 °Cmin⁻¹) ed un picco di 1100 °C. Tale ricerca ha posto le basi per le procedure di prova che sono servite a studiare l'idoneità di vari materiali dal punto di vista della protezione al fuoco nelle strutture offshore e negli impianti petrolchimici.

GALLERIE

In periodi recenti, il consistente numero di incidenti in alcune importanti gallerie europee, ha mostrato la necessità di introdurre scenari di incendio più severi di quelli considerati dalla normativa vigente. Tra gli incidenti di maggior rilievo si ricordano quelli sviluppatosi nella galleria ferroviaria sotto la Manica (Gran Bretagna/Francia, novembre 1996, $T_{max} = 1100$ °C), nei tunnel stradali del Monte Bianco (Italia/Francia, aprile 1999, $T_{max} = 1000$ °C), dei Tauri (Austria, giugno 1999, $T_{max} = 1000$ °C) e del Gottardo (Svizzera, ottobre 2001), nel tunnel per funicolare di Kaprun (Austria, novembre 2000). Diverse erano le caratteristiche dei rivestimenti interni: nella galleria sotto la Manica si era utilizzato calcestruzzo ad alte prestazioni molto armato, nei tunnel del Monte Bianco e dei Tauri calcestruzzo normale poco armato e nella galleria di Kaprun non era presente alcun rivestimento, essendo la roccia compatta e dotata di buone caratteristiche meccaniche. La durata di questi incendi è molto maggiore di quella caratterizzante gli edifici (solitamente inferiore alle 2 h; questo fenomeno è in parte dovuto alla difficoltà di raggiungere ed estinguere le fiamme che si sviluppano all'interno delle gallerie. Anche la forma influenza la capacità dei tunnel a resistere al fuoco. Ad

esempio, le gallerie a sezione rettangolare ottenute per scavo e ricoprimento, realizzate in calcestruzzo armato, presentano un comportamento di natura prevalentemente flessionale; un'eventuale distruzione del copriferro e lo spalling della volta potrebbe metterne a rischio la sicurezza. I tunnel a sezione circolare si distinguono dai suddetti in quanto presentano sotto carico un comportamento ad arco: durante l'incendio si ha un aumento degli sforzi a causa dell'espansione vincolata vicino alla superficie riscaldata, con possibile incremento della probabilità di esplosione superficiale del calcestruzzo. Per quanto concerne la modellazione del possibile scenario di incendio, diversi paesi hanno provveduto a stabilire curve temperatura-tempo atte a rappresentare in modo più realistico gli eventi reali. In Olanda, il ministero dei lavori pubblici (Rijswaterstaat, RWS) e il TNO-Center for Fire Research hanno proposto una curva di incendio molto severa per la valutazione dei materiali di protezione passiva dei tunnel. La curva RWS modella l'incendio più gravoso da idrocarburi, con il superamento in breve tempo della temperatura di 1200 °C, picco a 1350 °C dopo 60' e discesa graduale a 1200 °C in 120'. Tale curva si propone di simulare l'incendio in galleria di un'autobotte carico di petrolio, con sviluppo di una potenza di 300 MW per una durata di 2 h; il profilo temperatura-tempo utilizzato risulta particolarmente gravoso sia in termini di velocità iniziale di riscaldamento che di massima temperatura raggiungibile.

Si evidenzia tuttavia che la massima temperatura raggiunta negli eventi recenti di maggior entità non ha mai raggiunto i livelli previsti dalla curva RWS. La curva tedesca RABT invece, rappresenta un incendio meno gravoso rispetto al precedente, raggiungendo la massima temperatura di 1200 °C, mantenuta fino a 1 h, prima del raffreddamento a temperatura ambiente. È opportuno ricordare che molti materiali isolanti standard, normalmente utilizzati per edifici, perdono le loro proprietà oltre i 1200 °C; potrebbe dunque accadere che i materiali isolanti abbiano un buon comportamento se ci si riferisce alla curva ISO-834 o alla RABT ma non reggerebbero le temperature della curva RWS, più gravosa. Per questa ragione i produttori di materiali per l'isolamento termico del calcestruzzo di gallerie hanno sviluppato due diverse classi di prodotti: la prima adatta a temperature fino a 1200 °C basata su cemento portland, la seconda per temperature fino a 1350 °C basata su cementi alluminosi.

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

L'INCENDIO NEL CHANNEL TUNNEL

Il tunnel sotto il Canale della Manica, in cui corre il TGV, nonostante fosse dotato di un avanzato sistema di sicurezza, fu teatro, nel novembre del 1996, di un incendio di grande entità, a causa di una concomitanza di eventi imprevedibili e di errori umani. Le conseguenze sui viaggiatori si limitarono fortunatamente ad una persona lievemente intossicata; le conseguenze per la struttura furono considerevoli. Il tunnel si estende per 51 km e collega la Francia (Coquelles) con l'Inghilterra (Folkestone); è stato realizzato utilizzando un calcestruzzo ad alte prestazioni ($R_{ck} = 55$ MPa), studiato per avere una vita utile pari a 120 anni. Il treno in fiamme (n. 75399) si fermò a 19 km dall'ingresso francese, provocando danni considerevoli per una lunghezza di 480 m, corrispondente a 300 settori anulari (larghezza unitaria 1,6 m, spessore 0,4 m) di rivestimento del tunnel.

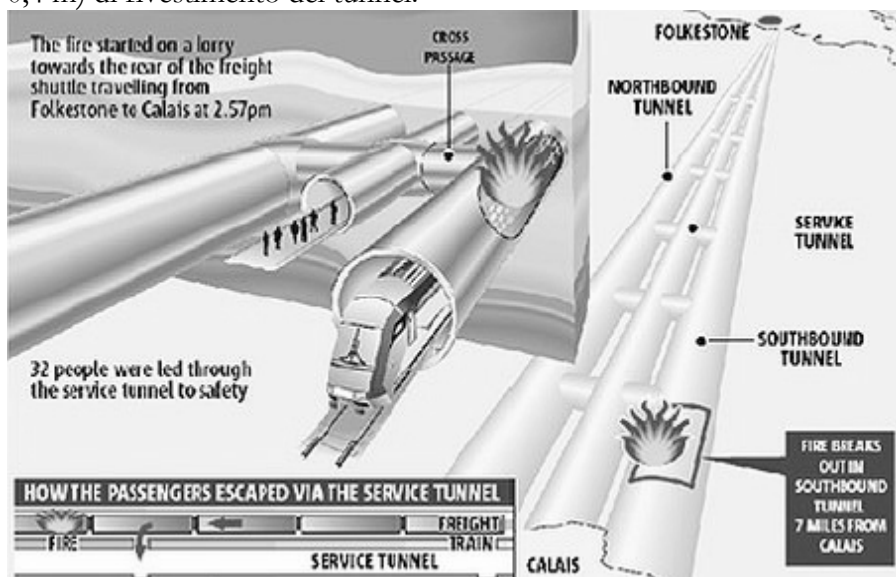


Figura 0-8 - Incendio nel Channel Tunnel, 1996

Le fiamme si svilupparono in una zona rivestita con calcestruzzo ad alte prestazioni; l'incendio durò 9 h e raggiunse temperature localmente superiori a 1000 °C. La parte maggiormente danneggiata aveva un'estensione di 30 m di lunghezza; al centro di questa zona il calcestruzzo interno sparì completamente per un tratto di diversi metri

e si rese visibile dietro le barre di armatura il gesso bianco costituente lo strato roccioso in cui il tunnel è stato scavato. Il calcestruzzo ad alte prestazioni si danneggiò dando origine, per spalling, a piccole schegge di spessore pari a 30 mm e lunghezza di 50–75 mm. Tale incidente ha chiaramente dimostrato che il calcestruzzo ad alte prestazioni del tratto considerato non fu in grado di resistere alle elevate temperature raggiunte al centro dell'incendio; ad ogni modo, considerata l'intensità del fenomeno, nessun altro materiale da costruzione sarebbe stato in grado di resistere ai gradienti termici che accompagnarono lo sviluppo delle fiamme. Tuttavia la presenza di forte armatura ha impedito lo stacco di pezzi di volta (verificatosi ad esempio negli incidenti dei tunnel del Monte Bianco e del Gottardo) e il calcestruzzo fessurato, rimanendo in posizione, ha svolto una funzione di protezione termica per il calcestruzzo retrostante. Il fenomeno è risultato comunque importante dal punto di vista scientifico perché ha permesso di studiare il comportamento dell'HPC alle diverse temperature rilevate a partire dal centro del focolaio e procedendo verso le zone indisturbate. Il ripristino strutturale è stato effettuato mediante l'utilizzo di un calcestruzzo fibrorinforzato (fibre metalliche) avente $R_{ck} = 60$ MPa.



Figura 0-9 - Danni al rivestimento del Channel Tunnel causati dall'incendio

L'INCENDIO NEL TUNNEL DEL MONTE BIANCO

L'incendio in una galleria veicolare è un'evidente fonte di rischio per le persone e le cose. Per rendersene conto basta fare mente locale sul carico di incendio rappresentato dai veicoli e dal materiale da questi

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

trasportato. Si ricordi la tragedia nel traforo del Monte Bianco, dove il 24 marzo 1999 un incendio originato in un autocarro coinvolse una ventina di altri autocarri e una decina di automobili, raggiungendo temperature superiori a 1000 °C e provocando la morte di 39 persone.



Figura 0-10 - Incendio nel tunnel del Monte Bianco, 1999

VIADOTTI

Si può citare un caso relativo ad una località prossima a Milano, che testimonia l'importanza del carico di incendio in ponti e viadotti: nel 1985 l'incendio di un'autobotte ferma sotto il sovrappasso a quattro corsie della tangenziale Ovest, direzione Nord, ha comportato il riscaldamento della struttura mista in acciaio-calcestruzzo (travi metalliche - impalcato in calcestruzzo). Nell'arco di circa 30 min le travi metalliche a doppio T si sono deformate con freccia irreversibile pari a circa 1 m (su una luce di semplice appoggio di 20 m), mentre nella soletta in calcestruzzo, lo stacco del copriferro (per effetto del fuoco e dell'eccessiva deformazione) ha messo in luce l'armatura dell'intradosso.

CENTRALI NUCLEARI

Le strutture di contenimento dei reattori nucleari presentano generalmente un doppio guscio: quello interno realizzato in calcestruzzo precompresso, quello esterno in calcestruzzo semplicemente armato. Il guscio interno, chiamato anche guscio primario, garantisce la tenuta ai gas e ai liquidi; quello esterno (guscio secondario) garantisce invece la resistenza all'impatto di oggetti volanti esterni e, grazie alla sua elevata duttilità, collabora alla resistenza ad esplosioni interne. L'eventuale fusione del reattore sottoporrebbe entrambi i contenitori ad elevate temperature, rendendo quindi

necessario uno studio accurato del comportamento del calcestruzzo ad alta temperatura; al materiale sono richieste caratteristiche di buona lavorabilità e compattezza, basso calore di idratazione, basso ritiro, elevata resistenza a trazione, ridotta reologia.

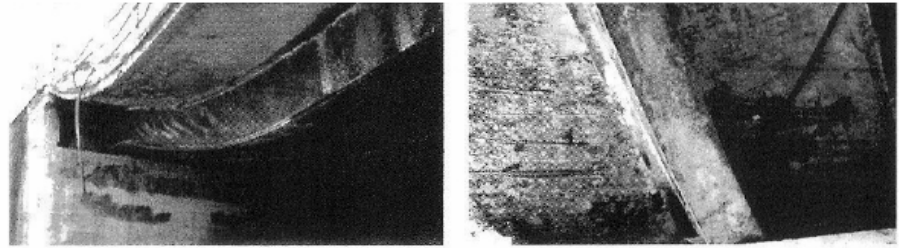


Figura 0-11 - Sovrappasso della Tangenziale Ovest dopo l'incendio

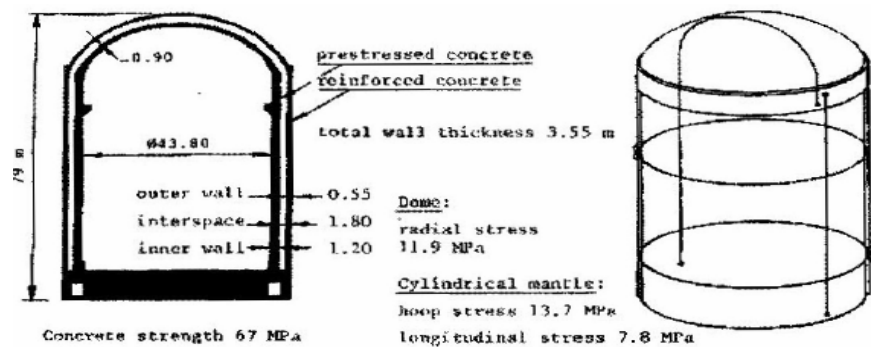


Figura 0-12 Struttura di contenimento secondario del reattore della centrale termoelettrica di Civaux a Poitiers, Francia

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

1.6 Temperature d'incendio in edilizia

Le temperature che possono essere raggiunte nel corso di un incendio dipendono principalmente dalle caratteristiche dei materiali presenti e dal grado di ventilazione. La temperatura delle fiamme può variare, a seconda dei casi, tra i 1700°C ed i 2500°C, mentre quella a soffitto, in un locale chiuso, si mantiene tra i 300°C ed i 400°C in una prima fase e poi raggiunge velocemente i 1000-1200°C. In pratica le temperature medie raggiunte sono in genere inferiori per via delle aperture che, prodotte da rottura dei vetri e da crolli, permettono lo sfogo dei fumi e del calore e l'afflusso di aria fresca; normalmente non si superano i 700-800°C .

I prodotti della combustione sono suddivisibili in quattro categorie:

- Gas di combustione
- Fiamme
- Fumo
- Calore

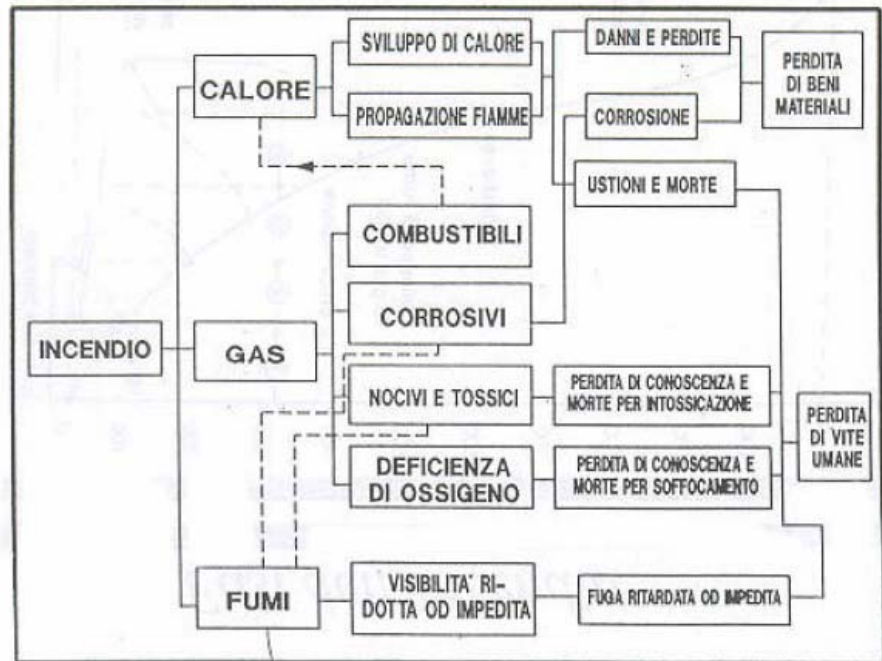


Figura 0-13 - Effetti dell'incendio

I gas di combustione sono quei prodotti della combustione che rimangono allo stato gassoso anche quando raggiungono raffreddandosi la temperatura ambiente di riferimento 15 °C.

I principali gas di combustione sono:

- Ossido di carbonio (CO)
- Anidride carbonica (CO₂)
- Idrogeno Solforato (H₂S)
- Anidride Solforosa (SO₂)
- Ammoniaca (NH₃)
- Acido cianidrico (HCN)
- Acido cloridrico (HCl)
- Perossido d'azoto (NO₂)
- Aldeide acrilica (CH₂CHCHO)
- Fosgene (COCl₂)

Capitolo 1 – Generalità sugli incendi

SOSTANZA	COMPOSTI TOSSICI DERIVANTI DA COMBUSTIONE	PRODOTTI MAGGIORMENTE TOSSICI
PVC	CO - CO ₂ HCl (acido cloridrico) Benzene - Toluene	HCl - CO
Poliammidi	CO - CO ₂ HCN (acido cianidrico)	HCN - CO
Poliesteri	CO - CO ₂ HCN (acido cianidrico) (HCl per i materiali clorurati)	HCN - CO
Resine fenoliche	CO - CO ₂ Fenolo e derivati	CO - Fenoli
Poliacrilici	CO - CO ₂ Metacrilato di metile	CO - Metacrilato di metile
Polistirene	CO - CO ₂ Toluene - Stirene - Benzene (idrocarburi aromatici)	CO - Idrocarburi aromatici
Legno e derivati	CO - CO ₂	CO
Lana	CO - CO ₂ HCN (acido cianidrico)	CO - HCN

Figura 0-14 - I Prodotti della combustione

Le fiamme sono costituite dall'emissione di luce e calore conseguente alla combustione di una sostanza solida, liquida o gassosa. Nell'incendio di combustibili gassosi è possibile valutare approssimativamente il valore raggiunto dalla temperatura di combustione dal colore della fiamma.

Colore della fiamma	Temperatura
Rosso nascente	525 °C
Rosso scuro	700°C
Rosso ciliegia	900°C
Giallo scuro	1100°C
Giallo chiaro	1200°C
Bianco	1300°C
Bianco abbagliante	1500°C

TABELLA 1 - Scala cromatica delle temperature nella combustione dei gas

I fumi sono formati da piccolissime particelle solide (aerosol), liquide (nebbie o vapori condensati).

Le particelle solide sono sostanze incombuste che si formano quando la combustione avviene in carenza di ossigeno e vengono trascinate dai gas caldi prodotti dalla combustione stessa.

A seconda del materiale che brucia il colore del fumo cambia, ciò può facilitare il riconoscimento del combustibile. Questo concetto può essere riassunto nella tabella sottostante, usata dai vigili del fuoco per determinare il combustibile, e quindi l'approccio da utilizzare per domare l'incendio. E dipende dal materiale che viene usato

Colore	Combustibile
Bianco	Fosforo, paglia
Giallo/marrone	Nitrocellulosa, polvere da sparo, acido nitrico, zolfo, acido solforico
Grigio/marrone	Carta, legno, stoffa
Marrone	Olio da cucina
Marrone/nero	Nafta, diluente per vernici
Nero	Benzina, carbone, catrame, plastica, cherosene, olio lubrificante
Viola	Iodio

TABELLA 2 - Scala cromatica dei fumi in funzione del tipo di combustibile

Il calore è la causa principale della propagazione degli incendi. Realizza l'aumento della temperatura dei materiali, provocandone il danneggiamento fino alla distruzione.

CAPITOLO 2. Dati statici dell'andamento degli incendi in Italia e in Campania

Il Corpo nazionale dei vigili del fuoco (in acronimo CNVVF) è un Organismo di sicurezza pubblica ad ordinamento civile della Repubblica italiana, con funzioni di polizia giudiziaria.

Dipende dal Ministero dell'interno, in particolare dal Dipartimento dei vigili del fuoco, del soccorso pubblico e della difesa civile, per mezzo del quale vengono espletati i compiti istituzionali previsti dalla legge.

Nell'ambito dell'organizzazione del Ministero dell'interno il Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, è una struttura preposta a garantire il soccorso tecnico urgente per la salvaguardia delle persone e dei beni, così come disposto dal D.lgs 139 dell'8 marzo 2006.

Al fine di assolvere al proprio compito di istituto, il Dipartimento si è dotato sia di strutture centrali che periferiche; in particolare, a livello periferico, il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco è articolato in Direzioni Regionali, Comandi Provinciali (con sede centrale nei capoluoghi di Provincia), distaccamenti e nuclei speciali.

Il soccorso tecnico urgente è affidato ai Comandi Provinciali che hanno competenza territoriale sull'intera provincia, ed è per questo che durante lo svolgimento della presente ricerca, è stata fatta una specifica richiesta di collaborazione proprio con il comando dei Vigili del Fuoco di Caserta, acquisita da questi con protocollo _____.

La richiesta di collaborazione era volta sia alla possibile partecipazione ad eventi gravi in cui poter valutare direttamente in sito le caratteristiche di una struttura post-incendio sia all'acquisizione di dati numerici che rendessero evidente l'importanza del fenomeno in Italia.

A seguito di vari incontri, pur non avendo avuto l'opportunità di valutare direttamente scenari complessi, sono stati acquisiti i dati richiesti, disponibili anche sul sito nazionale.

In tale contesto il dato statistico riveste una grande importanza.

A tal fine con la Circolare n°1 del 02/01/2003 è stato creato il Servizio di Statistica articolato come di seguito esposto:

- Servizio Statistico Centrale presso l'Area IX Telecomunicazioni e Statistica della DCRLS;
- Servizio Statistico Regionale presso le relative Direzioni;
- Servizio Statistico Provinciale presso i relativi Comandi.

Il Servizio Statistico Provinciale dipende dal relativo Comandante che lo coordina in base alle linee generali ed in linea con le indicazioni fornite dalla DCRLS Area IX e dalla Direzione Regionale.

Il Comandante provinciale dirige il servizio delegando, con atto formale, un Funzionario Tecnico.

I compiti principali assegnati al Servizio Statistico Provinciale sono:

- Collaborazione con il Servizio Statistico Regionale nella individuazione e aggiornamento dei dati da raccogliere e degli elementi statistici da produrre;
- Raccolta ed elaborazione dei dati finalizzata alle esigenze di carattere locale, anche ai fini di studio e ricerca;
- Produzione del Documento di Statistica Provinciale di fine anno.

Originariamente la compilazione del modello ministeriale VF41 avveniva su supporto cartaceo (fig. 1), il quale veniva successivamente trasmesso agli uffici centrali per la digitalizzazione attraverso dispositivi di riconoscimento ottico.

Modello VF41 Modulario 41 VF

MINISTERO DELL'INTERNO **CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO**

FOGLIO N. 2

SCHEMA STATISTICA - RAPPORTO D'INTERVENTO

SCHEDA		DATA		SCHEDA ALTRO COMANDO	
COMANDO		SEDE SERVIZIO			

DATI INTERVENTO

CHIAMATA	USCITA DALLA SEDE	ARRIVO SUL LUOGO	PARTENZA DAL LUOGO	RENTRO IN SEDE	LUOGO	DISTANZA
----------	-------------------	------------------	--------------------	----------------	-------	----------

DATI PREVENZIONE

INTERVENTO DI PIU' SQUADRE	PROVENIENZA DA ALTRO INTERVENTO	SURENTRO A SERVIZIO INIZIATO	ALL'APERTO
----------------------------	---------------------------------	------------------------------	------------

DATI GENERALI

COMUNE-FRAZIONE	PROV.	CODICE COMUNE	PROVINCIA FUORI ZONA
VIA-PIAZZA	N° CIVICO	N° PIANO FUORI TERRA	N° PIANO INTERRATO
PROPRIETARIO-RESPONSABILE LEGALE	AFITTUARIO	DITTA	

PERSONALE INTERVENUTO

ISPEZZORI	GEOMETRI	C.R.	C.S.	VIG. PER.	V.V.A.
POLIZIA DI STATO	CARABINIERI	GUARDIA FORESTALE	GUARDIA DI FINANZA	IT.AA.	VOLONTARI CIVILI
		VIGILI URBANI	U.S.L.		

PERSONALE INTERVENUTO

I PARTENZA	II PARTENZA
Capo partenza	
Personale	

RICHIEDENTE

Cognome
Nome
Comune
Frazione
Via-Piazza
Telefono

AUTOMEZZI INTERVENUTI Tipi _____ Targa _____

IMPIEGO DEI SOMMOZZATORI Profondità massima raggiunta metri _____

COLLEGAMENTO RADIO Effettuato ☐ SI ☐ NO Efficiente ☐ SI ☐ NO

ENTI PRESENTI ALL'ARRIVO SUL LUOGO _____

ENTI RICHIESTI PER PROSEGUITO INTERVENTO _____

SEGNALAZIONE DELL'INTERVENTO FONO N° _____ del _____ AI SEGUENTI INDIRIZZI

1) _____	4) _____
2) _____	5) _____
3) _____	6) _____

Oggi l'intera architettura informatica è in fase di revisione.

Entro l'anno corrente verrà aggiornata con una nuova, già sperimentata con successo dell'Area VIII della DCRLS presso alcuni Comandi Provinciali VF. Inoltre, l'Area VIII della DCRLS sta realizzando un portale web integrato che, oltre la nuova procedura STATRI web, offrirà nuovi servizi come ad esempio le informazioni inerenti i gruppi di sviluppo, gruppi di assistenza, la documentazione inerente la procedura (manuali di gestione e manuali con Tabellazione), servizi collaterali come

ad esempio la possibilità di suggerire miglioramenti della procedura da parte degli utilizzatori periferici etc.

STAT-RI-WEB
Sistemi Informativi Automatizzati

ULTIME NOTIZIE FAQ MANUALI CONTATTI CIRCOLARI TEAM

DEMO

MENU

- Torna alla lista schede
- Storico attività scheda
- Dichiarazioni scheda
- Modifica estremi scheda
- Modifica/Assegna compilatore

UTILITÀ

AUTENTICAZIONE

Utente: massimiliano.picone (Esci)
Sede: Centrale (RM.1000)
Turno: D
Ruoli: Resp. uff. statistico

ANOMALIE

Forse hai 7 schede aperte da troppo tempo.

Blocca Stampa Compilatore

Dati Generali

Numero: 0
Progressivo: 1
Data Intervento: 06/03/2014
Sede di serv.: La Rustica (RM.1006)

Scheda Altro Comando

Numero:
Anno:
Provincia: Inserisci il nome o la sigla della p...

Dati Temporal

Istante della chiamata	25/02/2014 14.11	<input type="checkbox"/> Proveniente da altro intervento <input type="checkbox"/> Non giunto sul luogo <input type="checkbox"/> Rediretto su altro intervento
Uscita dalla sede	25/02/2014 14.14	
Arrivo sul luogo	25/02/2014 14.26	
Partenza dal luogo	25/02/2014 15.21	
Rientro in sede	25/02/2014 15.35	

La tabella sopra riportata è quella definitiva.

In base a quanto stabilito dal Decreto Legislativo 8 marzo 2006, n. 139, il Corpo nazionale, al fine di salvaguardare l'incolumità delle persone e l'integrità dei beni, assicura gli interventi tecnici caratterizzati dal requisito di immediatezza della prestazione, per i quali siano richieste professionalità tecniche anche ad alto contenuto specialistico ed idonee risorse strumentali, ed al medesimo fine effettua studi ed esami sperimentali e tecnici nello specifico settore.

Di seguito vengono mostrate delle elaborazioni statistiche inerenti gli interventi di soccorso tecnico urgente effettuati negli anni 2012 e 2013. Come già accennato in essi non sono compresi gli interventi effettuati nelle calamità verificatesi in tale periodo.

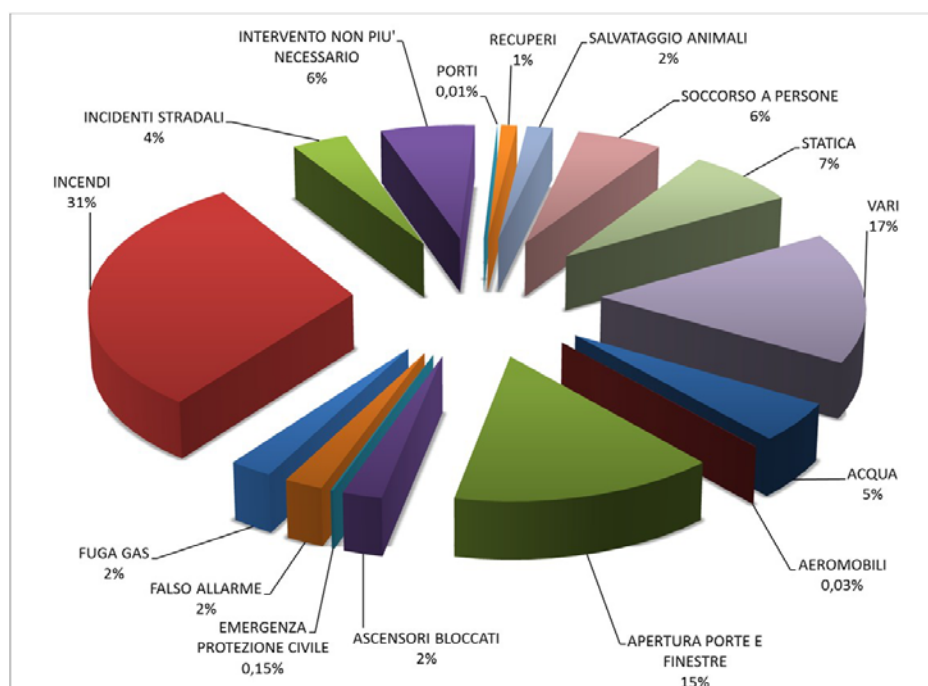


Tabella 2 – Andamento degli interventi per tipologia nel 2012.

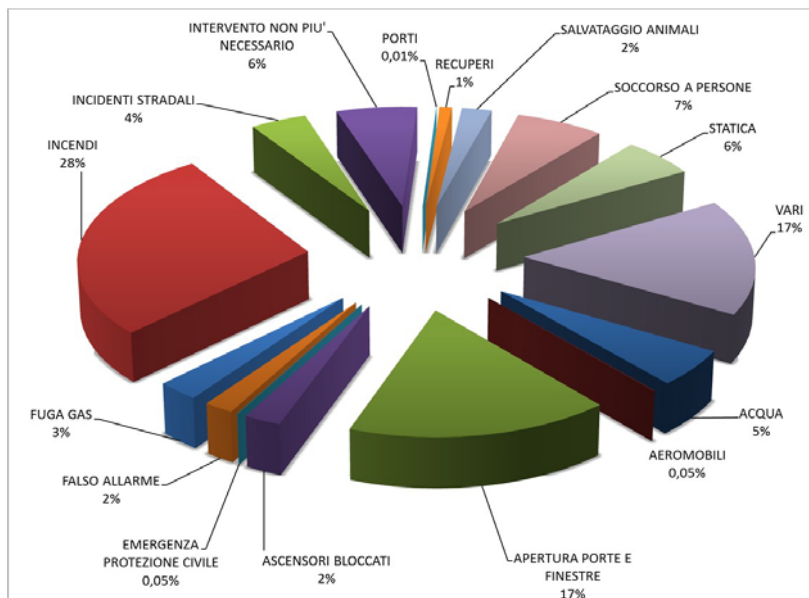


Tabella 3 – Andamento degli interventi per tipologia nel 2013.

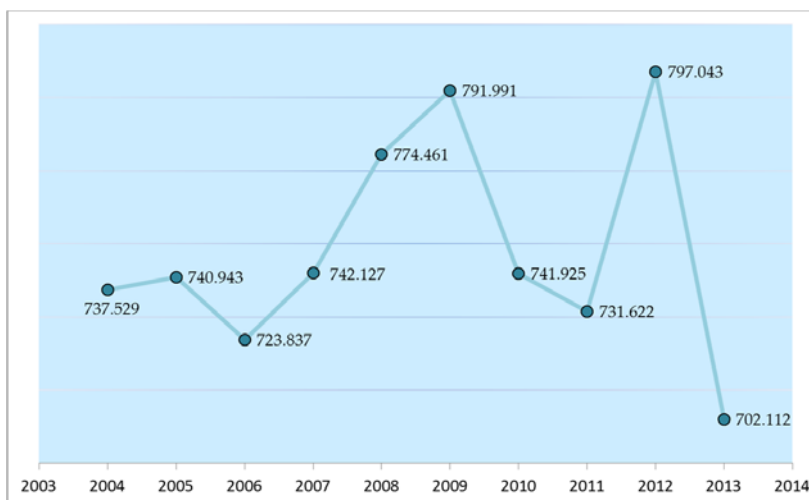


Tabella 4 - Interventi di soccorso tecnico urgente effettuati dal 2004 al 2013.

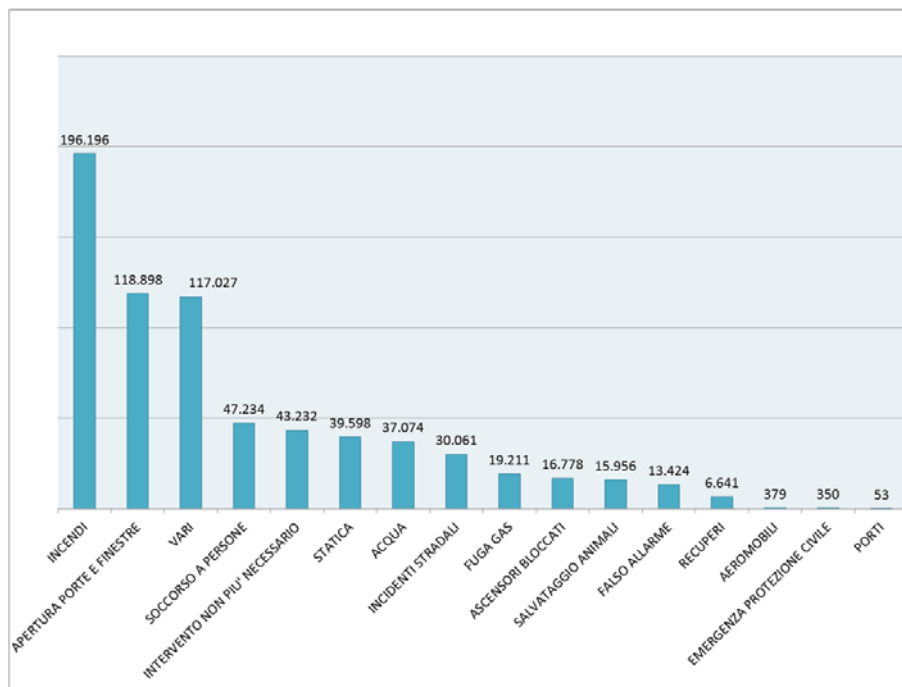


Tabella 5 – Andamento degli interventi per tipologia nel 2013.

Nel seguente grafico viene rappresentata la variazione percentuale degli interventi per tipologia del 2013 rispetto al 2012. Sono evidenziate in rosso le tipologie per le quali c'è stato un incremento del numero di interventi effettuati ed in verde quelle per le quali c'è stato invece un decremento.

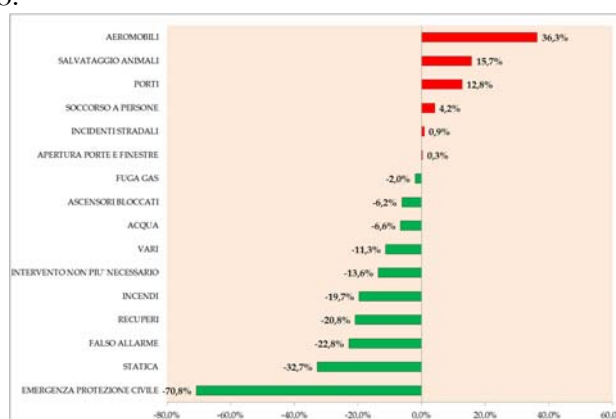


Tabella 6 – Variazione percentuale dal 2012 al 2013.

In questo paragrafo vengono mostrate alcuni report statistici inerenti gli interventi della tipologia “Incendi”.

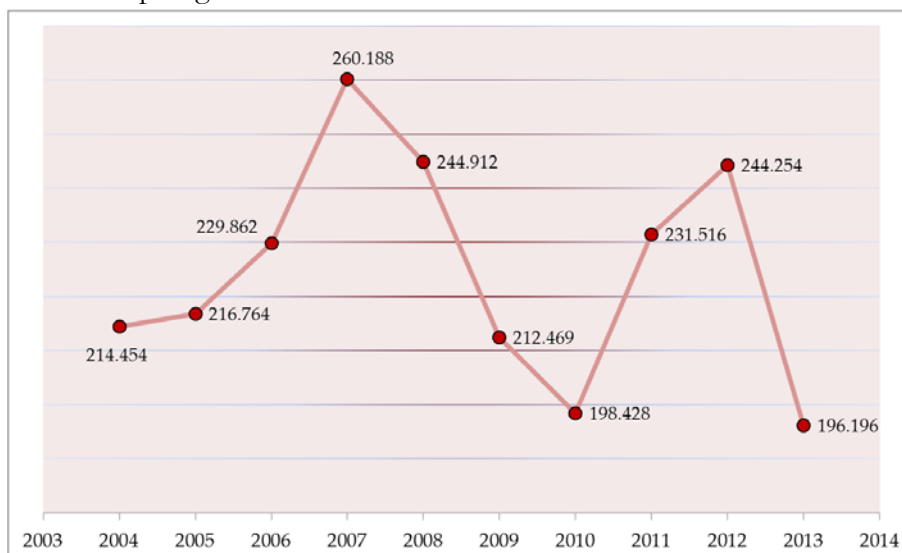


Tabella 7 – Andamento degli interventi della tipologia incendi nel dal 2004 al 2013.

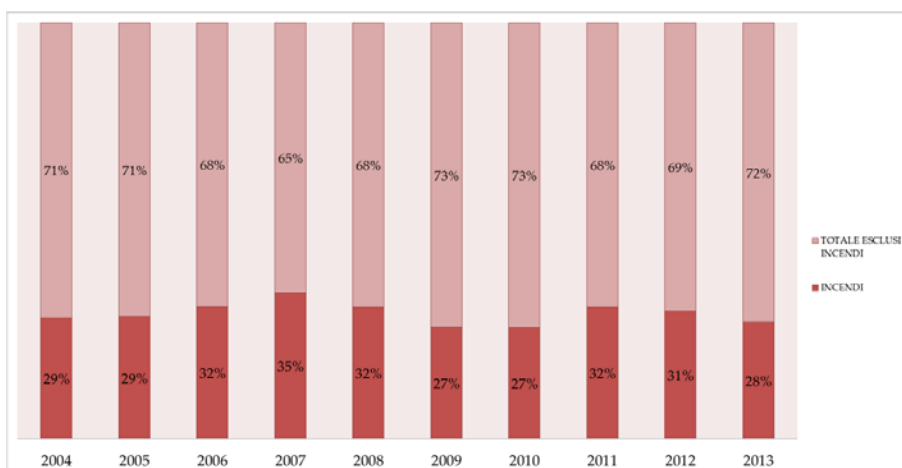


Tabella 8 – Percentuale degli interventi per incendi rispetto al totale dal 2004 al 2013.

Di seguito vengono riportate per l'anno 2012 e 2013 le tabelle “Dettaglio luogo” – “Tipologia intervento” in cui Tabellano

soltanto i luoghi per
frequenza maggiore di 500 eventi/anno. In particolare il filtro
applicato ha ristretto il numero dei luoghi da 201 a 26 ed il
dettaglio tipologia intervento da 4 ad 1.

4.3 Interventi di soccorso tecnico urgente a livello Regionale svolti nel periodo 01/01/2012-31/12/2013.

Nei tre sotto paragrafi che seguono vengono riportati rispettivamente il numero totale di interventi effettuati a livello regionale suddivisi per tipologia, il numero di interventi effettuati a livello regionale rapportati alla popolazione ed il numero di interventi per unità di superficie regionale.

4.3.1 Interventi di soccorso tecnico urgente per Regione.

Nelle seguenti tabelle viene rappresentato il numero di interventi effettuati rispettivamente negli anni 2012 e 2013, suddivisi per tipologia. In essa è stata applicata una formattazione ad istogrammi per riga che permette di evidenziare, per ogni tipologia di intervento, le differenze tra le Regioni.

	ABRUZZO	BASILICATA	CALABRIA	CAMPANIA	EMILIA ROMAGNA	FRULLI VENEZIA GIULIA	LAZIO	LIGURIA	LOMBARDIA	MARCHE	MOLISE	PIEMONTE	PUGLIA	SARDEGNA	SICILIA	TOSCANA	UMBRIA	VENETO	Totale Nazionale per Tipologia
TIPOLOGIA INTERVENTO																			
INCENDI	3.112	3.293	20.468	20.706	14.247	30.330	30.397	6.600	6.230	22.043	1.810	1.910	12.516	26.995	2.466	44.064	13.675	1.282	11.610
APERTURA PORTE E FINESTRE	3.947	3.886	4.590	8.929	13.430	3.723	8.600	6.295	6.958	6.958	5.999	719	12.399	3.636	4.295	8.702	12.739	3.811	8.725
STATICA	1.483	3.67	2.405	8.427	8.318	9.011	8.178	1.463	9.657	2.061	3.60	1.669	2.435	1.744	1.744	3.859	4.129	471	3.735
INTERVENTO NON PIU' NECESSARIO	1.407	628	1.329	4.611	3.618	879	3.043	1.519	6.514	1.783	321	4.173	4.070	1.522	1.522	5.643	3.221	917	2.846
SOCORSO A PERSONE	778	264	900	1.781	3.468	1.538	3.761	1.538	3.871	1.511	399	453	1.700	1.097	1.097	2.355	3.403	358	3.594
ACQUA	1.325	316	1.410	2.455	2.463	2.191	3.418	1.493	8.241	1.488	401	3.051	1.247	1.382	2.496	2.486	2.486	646	1.982
INCIDENTI STRADALI	798	305	826	2.847	1.857	2.239	2.239	856	4.491	1.358	340	2.956	1.372	1.203	1.486	1.955	352	3.262	29.804
RUGA GAS	540	147	553	1.374	1.719	474	2.476	1.060	2.534	551	118	1.843	881	672	1.592	1.523	287	1.232	19.598
ASCENSORI BLOCCATI	487	78	877	923	1.354	468	2.789	993	2.850	398	119	1.546	950	680	1.672	1.274	274	679	1.884
FALSO ALLARME	422	146	431	893	1.530	613	1.897	1.013	2.349	370	93	2.187	809	746	1.512	1.512	355	750	17.392
SALVATAGGIO ANIMALI	380	171	514	885	962	612	716	623	1.767	374	124	1.402	966	493	1.455	1.197	227	914	13.788
RICUPERO	559	154	351	375	480	212	627	215	857	1.079	292	770	231	137	413	731	568	896	8.390
EMERGENZA PROTEZIONE CIVILE	16	95	62	83	213	12	39	21	138	4	26	140	12	13	13	110	13	143	1.198
AEROMOBILI	2	0	7	10	18	5	18	15	39	6	0	10	20	52	23	7	39	278	0
PORTI	2	0	4	1	2	1	3	12	3	2	0	0	9	3	5	2	0	0	47
VARI	5.366	2.686	4.211	10.448	12.238	4.027	10.640	5.350	14.568	9.226	3.457	11.648	4.348	4.363	10.726	8.950	3.045	7.536	131.924
TOTALE PER REGIONE	27.644	11.536	38.968	60.375	66.707	27.743	67.738	29.294	92.287	24.854	9.357	60.743	90.039	25.667	88.483	56.847	16.013	47.733	797.043

Tabella 56 – Numero di Interventi per regione suddivisi per tipologia effettuati nell'anno 2012.

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

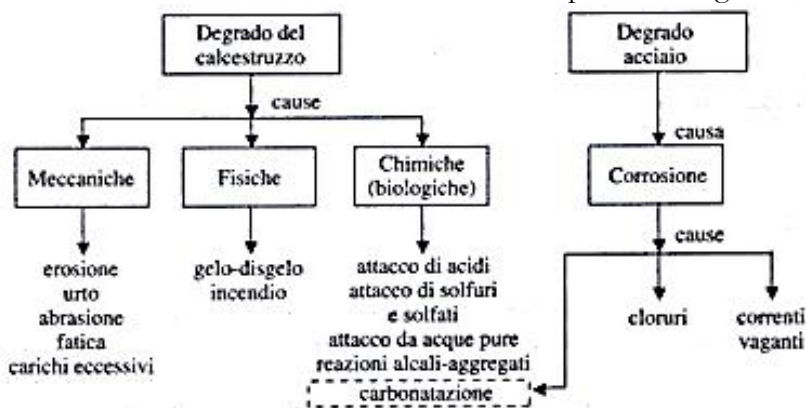
Il patrimonio edilizio italiano è ricco di opere in cemento armato, che rappresenta ancora il materiale più diffuso in edilizia, sia per la facile reperibilità che per la eccezionale lavorabilità che permette di realizzare le forme più diverse.

Uno degli aspetti più delicati però del suo utilizzo è rappresentato dalla durabilità, condizionata fortemente anche dalle variabili durante l'esecuzione delle opere e lo stesso confezionamento del materiale.

La durabilità, in base a quanto stabilito anche dalle NTC08, definisce la capacità della struttura di conservare le sue prestazioni di progetto per tutta la durata della sua vita utile nominale.

3.1- Cause di degrado del calcestruzzo armato

Le cause di aggressione dovute all'ambiente possono essere formalmente suddivise in chimiche, fisiche e meccaniche. In realtà difficilmente in un processo di degradazione esiste un solo fenomeno aggressivo, spesso sono più cause che concorrono al deterioramento del materiale esaltandosi vicendevolmente. Tuttavia esiste sempre quella che può essere definita la causa fondamentale che innesca il processo degradante.



Schema delle cause di degrado

Tra le cause chimiche occorre innanzitutto distinguere quelle riguardanti gli agenti aggressivi "natural", quali, per esempio l'acqua di mare, e le cause concernenti gli agenti chimici "artificiali" prodotti dall'uomo, quali

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

gli acidi inorganici, le sostanze organiche, etc. derivanti quasi sempre dagli scarichi industriali.

Le cause di tipo fisico sono legate ai cicli geo e disgelo e più in generale alle variazioni termiche, specialmente se cicliche, che causano stati di coazione tra gli inerti e la pasta cementizia che compongono il calcestruzzo.

Le cause di tipo meccanico sono legate alle azioni esterne più comuni (come i carichi) o di tipo accidentale come urti, erosione, esplosione, etc. in questo caso il materiale subisce dei danni che vanno dalla fessurazione al distacco di parti riducendone non solo la resistenza ma anche la duttilità e la rigidità.

3.1.1. Attacco dei solfati (*degrado di tipo chimico*)

Tra tutti gli agenti aggressivi del calcestruzzo i solfati sono indubbiamente i più importanti sia per la frequenza con cui si può manifestare l'attacco solfatico, sia per le conseguenze estremamente negative che essi sono capaci di provocare. L'attacco solfatico si manifesta attraverso un rigonfiamento esagerato del conglomerato.

Quando il calcestruzzo è immerso in acqua potabile esso tende a rigonfiarsi di alcune centinaia di micron per metro in qualche anno. Il rigonfiamento che si manifesta in un calcestruzzo immerso in acqua solfatica è molto maggiore di quello concernente l'immersione in acqua potabile, è di tale entità che si possono verificare fessurazioni o distacchi del materiale



Figura 1 - Esempio di struttura interessata da aggressione solfatica

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

Il meccanismo di azione dei solfati (SO_4^{2-}) può essere descritto con due fasi.

- Reazione tra il solfato e l'idrossido di calcio che si libera durante la reazione di idratazione del cemento, per formare il calcio solfato;
- Reazione tra il calcio solfato e gli alluminati idrati di calcio (prodotto di idratazione del cemento ricco in alluminato tricalcico) per dare il solfoalluminato di calcio (ettringite)

Entrambe queste reazioni determinano un aumento di volume in quanto i prodotti di reazione (calcio solfato ed ettringite) hanno un volume maggiore dei prodotti di partenza (idrossido di calcio ed alluminato idrato di calcio)



Figura 2 - Distruzione progressiva (da sinistra verso destra) di un provino di conglomerato cementizio immerso in ambiente solfatico

3.1.2 ATTACCO DEI SOLFURI (*Degrado di tipo chimico*)

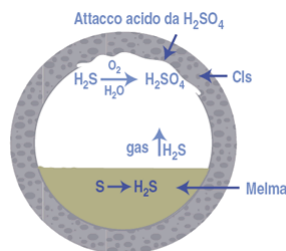


Figura 3 - schema di attacco acido del calcestruzzo nella volta della tubazione fognaria

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

Il solfuro (S^{2-}) può essere presente in natura nei terreni, nelle acque di falda, di palude o di fogna. Esso può presentarsi come sale (per esempio solfuro di ferro o pirite FeS_2) o come acido (idrogeno solforato o acido solfidrico H_2S)

In realtà il solfuro non sembra avere di per sé un'azione aggressiva nei confronti del calcestruzzo. Tuttavia la sua trasformazione in altri composti può provocare il deterioramento del calcestruzzo. In effetti molto spesso la presenza del solfuro conduce alla formazione di acidi ai quali in definitiva si deve l'azione aggressiva nei confronti del conglomerato

3.1.3. ATTACCO DA ANIDRIDE CARBONICA (*Degrado di tipo chimico*)

L'aggressione dovuta alla CO_2 si può manifestare in due diversi modi a seconda del contesto in cui ci si trova. Nelle opere esposte all'aria si verifica la carbonatazione del calcestruzzo, mentre nelle opere idrauliche s'instaura il fenomeno del dilavamento della pasta cementizia.

La carbonatazione è dovuta alla penetrazione della CO_2 nel calcestruzzo. Il fenomeno consiste nella trasformazione della calce, che si genera a seguito dell'idratazione del cemento, in carbonato di calcio a causa della presenza di anidride carbonica, il cui contenuto dipende dall'ambiente in cui ci si trova.

Un calcestruzzo sano ha un pH maggiore di 13 e in questa condizione sui ferri di armatura si crea un film di ossido ferrico passivo che li impermeabilizza al passaggio di ossigeno e umidità. Se la struttura è carbonatata il pH del cls si abbassa passando a valori che possono essere anche inferiori a 9, creando così un ambiente poco alcalino per le armature. In presenza di pH inferiori a 11 il film passivante viene neutralizzato lasciando così i ferri esposti all'aggressione dell'ossigeno e dell'umidità presenti nell'aria. In queste condizioni si innesca il processo di corrosione delle armature che aumentano il loro volume di circa 6 volte. Il copriferro in questo modo si distacca dall'armatura fino ad arrivare alla completa espulsione.

Una volta che il calcestruzzo è degradato il deterioramento dei ferri sarà sempre più veloce in quanto si creeranno vie di accesso più facili per ossigeno e umidità

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato



Figura 4 - Struttura degradata a causa della corrosione dei ferri

Il fenomeno del dilavamento consiste nell'asportazione di matrice cementizia dovuta ad un'azione meccanica dell'acqua sul calcestruzzo come si può notare nella foto 5. Questo fenomeno è aggravato se ci troviamo in presenza di acque particolarmente acide a causa dell'anidride carbonica aggressiva, presente soprattutto nelle acque pure di montagna, oppure per la presenza di sostanze dovute a scarichi industriali o ancora, per colpa dell'acido solforico di origine organica, che si sviluppa nelle acque reflue delle fognature.



Figura 5 - Effetto del dilavamento su una superficie in calcestruzzo

3.1.4. ATTACCO DA CLORURI (*Degrado di tipo chimico*)

L'aggressione da parte dei cloruri sul calcestruzzo può avvenire se questo rimane a contatto con ambienti in cui il contenuto è alto, come l'acqua marina o i sali disgelanti, oppure se confezionato con materie prime inquinate. Il cloruro una volta penetrato nel cls se raggiunge i ferri

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

d'armatura elimina il film passivante di ossido ferrico lasciandoli così esposti al processo di corrosione.



Figura 6 - Corrosione dovuta all'attacco dei cloruri

La penetrazione ha inizio sulla superficie per poi proseguire all'interno del calcestruzzo; il tempo di penetrazione dipende da:

- Concentrazione di cloruri che entrano in contatto con la superficie del cls;
- Permeabilità del cls;
- Percentuale di umidità presente.

La corrosione avviene con la combinazione di due fattori, entrambi necessari. La presenza di cloruri, che depassivizzano i ferri e l'umidità unita all'ossigeno. Ad esempio una struttura completamente immersa nell'acqua marina, presenterà un contenuto di cloruri sicuramente molto alto, ma avendo le porosità totalmente sature di umidità, l'ossigeno non riuscirà a penetrare e di conseguenza la corrosione dei ferri non avverrà o sarà trascurabile. Considerando sempre una struttura realizzata nell'acqua di mare, la zona che è più interessata dal degrado dovuto ai cloruri è la splash-zone, cioè quella che a causa del moto ondoso o delle maree è periodicamente bagnata e asciutta. Per quanto riguarda i sali disgelanti, questi vengono stesi sul manto stradale nei periodi invernali, e grazie all'acqua piovana penetrano nella struttura, creando corrosione e quindi degrado.

Una volta innescato il processo, qualsiasi sia l'ubicazione della struttura, la corrosione diventa più veloce in quanto trova vie di accesso più facili.

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

La concentrazione di cloruri necessaria a promuovere la corrosione dei ferri è direttamente proporzionale al pH del cls, più è alcalino più cloruro è necessario per innescare il processo. Facendo riferimento a quest'ultima considerazione, si può legare il fenomeno della carbonatazione al degrado dovuto ai cloruri, in quanto il primo abbassa il pH del cls e quindi rende vulnerabili anche porzioni di struttura che presentano una minor concentrazione di cloruri.

3.1.5. ATTACCO DA CICLI DI GELO-DISGELO (*Degrado di tipo fisico*)

L'effetto del ghiaccio è deleterio solo se c'è acqua allo stato liquido all'interno del cls. Questo non vuol dire che debba essere perfettamente secco ma che il livello di umidità non superi un determinato valore chiamato "saturazione critica".

S'intende che l'acqua presente all'interno della porosità deve essere al di sotto di detto valore in modo che pur aumentando di volume ghiacciando, riesca a rimanere all'interno dei pori senza creare tensioni. Differentemente se l'acqua riempisse tutto o quasi il volume dei pori, ghiacciando andrà a spaccare il cls a causa della pressione instaurata (l'acqua ghiacciando aumenta il suo volume di partenza del 9%).

Per limitare gli effetti negativi delle basse temperature bisogna diminuire la microporosità capillare e favorire la presenza di macropori (dimensioni comprese tra 100 e 300 μm), aggiungendo alla miscela additivi aeranti, mantenere un basso rapporto a/c ma soprattutto utilizzare aggregati non gelivi.



Figura 7 - Degrado dovuto al gelo

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

3.1.6. ALTE TEMPERATURE (*Degrado di tipo fisico*)

L'effetto delle alte temperature sul calcestruzzo è distruttivo. I ferri di armatura possono resistere fino ad una temperatura di 500°C mentre il calcestruzzo può resistere fino a 650°C.

La funzione del copriferro in questo caso è fondamentale in quanto rallenta il propagarsi della temperatura. Più è spesso il copriferro maggiore è il tempo che i ferri ci mettono a raggiungere la temperatura di collasso di 500°C.

I danni che il fuoco può creare al calcestruzzo sono molti e molto importanti:

Le armature pur protette dal copriferro riscaldandosi sotto l'effetto delle alte temperature espandono il loro volume, creando tensioni nel cls fino all'espulsione dello stesso.

Una volta che le armature sono esposte al fuoco, espandono molto più velocemente del cls in cui sono inserite causandone l'espulsione e la perdita di aderenza.

Pur non arrivando alla temperatura limite di collasso, il calcestruzzo può perdere le sue caratteristiche prestazionali nel momento in cui viene repentinamente raffreddato, situazione che si crea quando si eseguono le operazioni di spegnimento dell'incendio. In questa situazione l'ossido che si è formato a causa del calore si trasforma in calce disintegrando il cls.

Sulla faccia più vicino al fuoco a causa dell'estremo caldo si verifica spalling dovuto alla rapida espansione, alcuni aggregati scoppiando potrebbero staccare anche il cls adiacente, stesso risultato che si ha quando l'umidità presente si trasforma repentinamente in vapor acqueo creando piccoli scoppi.

Se l'esposizione al fuoco è prolungata anche le armature raggiungono la temperatura di collasso e perdono la loro resistenza a trazione, causando il cedimento della struttura.

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato



Figura 8 - Degrado per esposizione alle alte temperature

3.1.7. RITIRO E FESSURAZIONE (*Degrado di tipo fisico*)

In questo paragrafo verranno trattati due tipi di ritiro, quello plastico e quello igrometrico.

Il primo avviene quando il calcestruzzo ancora nella fase plastica cede parte della sua umidità all'ambiente esterno causando così una contrazione. La fessurazione in questo caso è legata alle condizioni in cui viene realizzato il getto. In strutture casserate l'evaporazione non avviene per ovvi motivi, mentre in opere dove il cls è direttamente a contatto con l'ambiente, avviene a causa della temperatura, della bassissima umidità esterna o del forte vento. Il ritiro plastico avvenendo quando il calcestruzzo è ancora fresco può portare ad una micro fessurazione superficiale.



Figura 9 - Fessurazione di lastre in calcestruzzo

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

Il ritiro igrometrico è dovuto alla cessione di umidità all'ambiente con un U.R. bassa lungo tutto l'arco della vita utile.

Per evitare i problemi dovuti al ritiro plastico bisogna evitare che l'acqua presente nell'impasto evapori troppo velocemente, questo si può fare in più modi:

- Stendendo sul getto un telo impermeabile che impedisce l'evaporazione
- Nebulizzando completamente la superficie nei primi giorni dopo il getto
- Applicando sul getto ancora fresco un film di prodotto antievaporante

Siccome il calcestruzzo "consuma" la maggior parte del ritiro igrometrico nei primi sei mesi, è impossibile pensare di bagnarlo per tutto il tempo quindi si deve agire su fattori diversi, quali, diminuire il rapporto a/c e aumentare il rapporto i/c.

3.1.8. ABRASIONE (*Degrado di tipo meccanico*)

Se un materiale viene investito ripetutamente da particelle provenienti da un altro corpo più duro s'instaura il fenomeno dell'abrasione. Questo avviene a causa dell'attrito che le polveri più dure esercitano sulla superficie del materiale. Quindi si può benissimo capire che l'abrasione dipende direttamente da caratteristiche interne al materiale costituente il calcestruzzo. Possiamo di conseguenza migliorare la resistenza all'abrasione sia abbassando il rapporto a/c sia facendo uno spolvero di cemento miscelato ad additivi ed aggregati duri sulla superficie del calcestruzzo.

Fattori che influenzano la resistenza all'abrasione:

- Resistenza alla compressione;
- Proprietà degli aggregati;
- Finitura;

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

- Condizioni della superficie.

Strutture particolarmente interessate da questo fenomeno sono le pavimentazioni industriali, gravate da un continuo passaggio di mezzi.



Figura 10 - Effetto delle abrasioni di una pavimentazione industriale

3.1.9. URTI (*Degrado di tipo meccanico*)

Un altro tipo di degrado dovuto a cause meccaniche è quello provocato da urti. Le considerazioni da fare non sono molte in questo caso in quanto il calcestruzzo è un materiale fragile e quindi se subisce degli impatti di una certa entità si degrada con conseguente perdita di resistenza. Non è detto che il danno si presenti immediatamente, può essere che questo avvenga dopo molti cicli, ad esempio su giunti di una pavimentazione gravati dal passaggio di mezzi meccanici. In questo caso l'unico metodo per diminuire gli effetti di degrado è quello di confezionare un cls il più resistente possibile. Per rendere il calcestruzzo più resistente agli urti è bene rinforzarlo con delle fibre in acciaio in modo che l'eventuale energia d'impatto sia meglio ripartita su tutta la struttura.

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato



Figura 11 - Esempio di degrado dei giunti di una pavimentazione industriale

3.1.10 DIFETTI

Il calcestruzzo è una miscela di più elementi. Il suo confezionamento è legato alle singole esigenze, più alte sono le richieste più delicato è il mix-design. I componenti principali sono il cemento, gli aggregati, l'acqua e gli additivi. Ognuno di questi se utilizzato nella maniera scorretta potrebbe creare uno o più punti deboli. Ipotezzando di avere a disposizione i migliori prodotti presenti sul mercato ma per scarsa conoscenza o per altri motivi vengono miscelati tra di loro con rapporti del tutto errati, il risultato sarà il medesimo di quello che si raggiungerebbe se venissero utilizzati gli “ingredienti” più scadenti. È di fondamentale importanza curare la qualità dei materiali ma ancor di più la miscela tra di essi.

. Riguardo a questo “ingrediente” bisogna fare una considerazione e cioè che pur essendo l'elemento che fa da legante e che quindi fa in modo che vengano raggiunte le prestazioni richieste, non sempre aumentandone la quantità si migliorano le prestazioni. Si può facilmente comprendere che più cemento è presente in un impasto più elevato sarà il ritiro che il getto subirà.

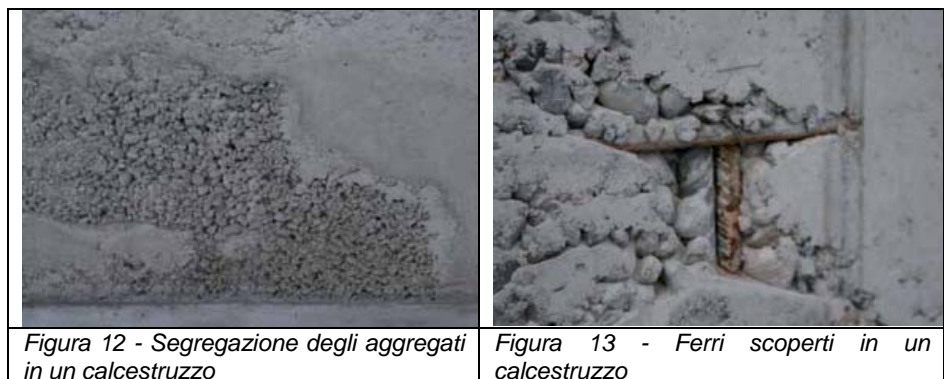
Gli aggregati devono essere di granulometria adatta e ben dosati tra parte grossa e fine, ben puliti perché sostanze estranee potrebbero variare le caratteristiche previste o nel peggiore dei casi essere la causa del degrado se inquinati da sostanze come quelle analizzate nei paragrafi precedenti.

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

Per la scelta dell'additivo è fondamentale sapere che tipo di caratteristiche si vogliono dal calcestruzzo. Nella miscela tra gli elementi, il rapporto acqua/cemento (a/c) gioca un ruolo fondamentale insieme a quello aggregati/cemento. Il primo a parità di qualità più basso è meglio, il secondo deve essere ben proporzionato secondo la quantità di parti fini e grosse.

Riassumendo i difetti del calcestruzzo possono essere raggruppati in tre famiglie:

1. **Difetti dovuti alla mal progettazione della miscela;**
2. **Difetti dovuti a una sbagliata composizione;**
3. **Difetti dovuti ad un'errata messa in opera.**



3.2.Degrado dell'acciaio: la corrosione

La corrosione è in generale il deterioramento di un metallo causato da una reazione sulla superficie, di tipo chimico o elettrochimico, con l'ambiente che lo circonda. Questa reazione provoca la riduzione della sezione resistente del materiale, ma nel caso di barre di acciaio immerse nel calcestruzzo è forse più importante il fenomeno della formazione

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

dell'ossido di ferro (comunemente chiamata ruggine) che avendo un volume maggiore del materiale originario (volume specifico fino a 17 volte maggiore) fa nascere delle tensioni nel calcestruzzo provocandone la fratturazione nelle zone di ricoprimento dell'armatura e anche perdita di aderenza.

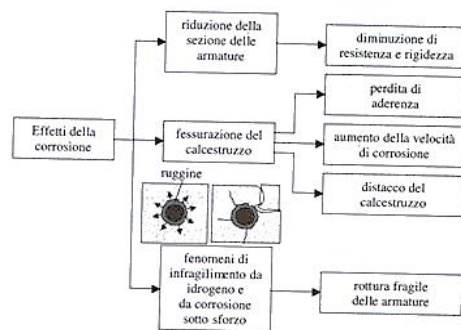


Figura 14 - Effetti della corrosione

La corrosione può avvenire in due modalità:

a secco: avviene per azione dei gas quali ossigeno, idrogeno, e vapori di zolfo. I prodotti di ossidazione del ferro (Fe) hanno scarsa densità e bassa resistenza meccanica formano voluminose incrostazioni superficiali poco aderenti, che portano continuamente allo scoperto nuove porzioni di metallo.

Elettrochimica: dipende dalla presenza dell'umidità dell'aria. Sulla superficie del metallo, si trova sovente un velo d'acqua o di vapor d'acqua, che provoca la formazione sulla superficie del metallo di innumerevoli celle galvaniche (pile) , con circuito ionico nel velo d'acqua o di vapore, e circuito elettronico nella massa del materiale metallico.

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato



Figura 15 - Formazione dell'ossido di ferro (Ruggine)

3.3. Classi di esposizione

Il degrado del calcestruzzo può essere evitato facendo attenzione alla progettazione, considerando attentamente l'ambiente in cui questo sarà messo in opera.

La norma tecnica UNI 11104:2004, (Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1) individua 6 classi d'esposizione, per ognuna delle quali vengono date indicazioni per la progettazione, confezionamento e messa in opera del calcestruzzo.

Tutte le classi e sottoclassi vengono definite e descritte dalla norma UNI 11104 come segue:

CLASSE X0: Per calcestruzzo privo di armatura o inserti metallici: tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo/disgelo, o attacco chimico.

Calcestruzzi con armatura o inserti metallici: in ambiente molto asciutto.

CLASSE XC: Corrosione indotta dalla carbonatazione.

XC1: Asciutto o permanentemente bagnato

XC2: Bagnato, raramente asciutto

XC3: Umidità moderata

XC4: Ciclicamente asciutto e bagnato

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

Classe di esposizione	Ambiente	Struttura	Sottoclassi
XD	Assenza di rischio di corrosione o attacco	Calcestruzzo armato e non	XD
XC	Corrosione indotta da carbonatazione	Calcestruzzo armato	XC1, XC2, XC3, XC4
XD	Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare	Calcestruzzo armato	XD1, XD2, XD3
XS	Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare	Calcestruzzo armato	XS1, XS2, XS3
XF	Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza sali disgelanti	Calcestruzzo armato e non	XF1, XF2, XF3, XF4
XA	Attacco chimico	Calcestruzzo armato e non	XA1, XA2, XA3

TABELLA 1 - Classi di esposizione secondo la UNI 11104

CLASSE XD: Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare.

XD1: Umidità moderata

XD2: Bagnato, raramente asciutto

XD3: Ciclicamente asciutto e bagnato

CLASSE XS: Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare.

XS1: Esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare

XS2: Permanentemente sommerso

XS3: Zone esposte agli spruzzi oppure alla marea

CLASSE XF: Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza disgelanti.

XF1: Moderata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante

XF2: Moderata presenza d'acqua in presenza di agente disgelante

XF3: Elevata saturazione d'acqua in assenza di agente disgelante

XF4: Elevata saturazione d'acqua con presenza di agente disgelanteo acqua di mare

CLASSE XA: Attacco chimico da parte di acque del terreno e acqua fluenti.

CAPITOLO 3. Degrado e durabilità del cemento armato

XA1: Ambiente chimicamente debolmente aggressivo

XA2: Ambiente chimicamente moderatamente aggressivo

XA3: Ambiente chimicamente fortemente aggressivo

Nel caso in cui ci si trovi in un ambiente che comprende più classi d'esposizioni, in teoria bisognerebbe realizzare tanti tipi di calcestruzzo quante sono le classi. In realtà questo non può essere fatto di conseguenza quando si trovano condizione di questo genere si confeziona il calcestruzzo con le prescrizioni dettate dalla classe d'esposizione peggiore.

La Tabella 6 riassume direttive per il confezionamento di calcestruzzo a seconda della classe d'esposizione, secondo la norma UNI 11104.

Classe	Sottoclasse	Max a/c	Min R _{ck} (Mpa)	Min contenuto di cemento (kg/m ³)	Spessore di copriferro	
					c.a.(mm)	c.a.p.(mm)
X0	-	Nessun limite	Nessun limite	Nessun limite	15	20
XC	XC1	0,65	25	300	15	25
	XC2	0,60	30	300	25	35
	XC3	0,55	37	320	25	35
	XC4	0,50	37	340	30	40
XD	XD1	0,55	37	320	45	55
	XD2	0,55	37	340	45	55
	XD3	0,45	45	360	45	55
XS	XS1	0,50	37	340	45	55
	XS2	0,45	45	360	45	55
	XS3	0,45	45	360	45	55
XF	XF1	0,55	37	320	30	40
	XF2	0,55	30	340	45	55
	XF3	0,50	37	340	30	40
	XF4	0,45	30	360	45	55
XA	XA1	0,55	37	320	25	35
	XA2	0,50	37	340	25	35
	XA3	0,45	45	360	25	35

TABELLA 2 - Direttive per il confezionamento del calcestruzzo secondo la UNI 11104

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Gli incendi sono degli eventi eccezionali che possono avere conseguenze molto gravi negli edifici. I materiali da costruzione, soggetti all'azione del fuoco, possono rammollire, fondere, decomporsi o carbonizzarsi; inoltre possono aggravare le conseguenze dell'incendio in seguito alla loro combustione, alla produzione di calore, allo sviluppo di fiamme, al rilascio di fumi o sostanze tossiche.

Il concetto di resistenza al fuoco non è, di per sé, applicabile ad un materiale, bensì ad un elemento strutturale. È altresì vero che le proprietà di un materiale non possono non influenzare quelle di un elemento strutturale da esso costituito e che, di conseguenza, risulti opportuno discutere dell'influenza che il fuoco e le alte temperature esercitano sul calcestruzzo.

Le strutture in calcestruzzo sono note per il loro buon comportamento in caso d'incendio (fatto evidenziato dalla grande quantità di edifici che, in seguito ad un grave incendio, sono stati riparati e rimessi in esercizio) e, a tal proposito, occorre ricordare alcuni aspetti positivi del materiale:

- il calcestruzzo presenta bassa conducibilità termica;
- durante il riscaldamento, la pasta di cemento presente nel calcestruzzo subisce processi chimico-fisici endotermici, che ritardano la trasmissione del calore alle strutture esposte al fuoco;
- durante l'incendio il calcestruzzo mantiene la propria geometria, proteggendo, grazie al copriferro, l'acciaio dell'armatura e permettendo al nucleo interno più freddo di continuare a svolgere la propria funzione strutturale.

Ma, come si è già specificato, durante il riscaldamento, il calcestruzzo è sottoposto a trasformazioni, a livello, microstrutturale, in grado di intervenire sensibilmente sul comportamento del materiale. In particolare questo può influire su due aspetti negativi importanti, quali il deterioramento delle proprietà meccaniche e il rischio di spacco del materiale, che può compromettere la capacità portante dell'elemento e l'isolamento di eventuali barre di armatura.

4.1. Trasformazioni chimico-fisiche del materiale

Il deterioramento delle proprietà meccaniche del calcestruzzo può essere attribuito a tre fattori propri del materiale:

- Trasformazioni chimico-fisiche nella pasta cementizia;
- Trasformazioni chimico-fisiche nell'aggregato;
- Incompatibilità termica tra aggregato e pasta cementizia.

È influenzato da molti fattori ambientali, tra cui vanno ricordati la temperatura, la velocità di riscaldamento, i carichi applicati, la possibile presenza di impermeabilizzazione esterna.

Il calcestruzzo esposto alle alte temperature è sottoposto a cambiamenti nella composizione chimica, nella struttura fisica e nel contenuto d'acqua. Tali modifiche hanno luogo principalmente nella pasta di cemento indurita, ma, con alcune limitazioni, possono aver luogo anche negli aggregati con riflessi importanti sia sulle proprietà fisiche che su quelle meccaniche del materiale stesso.

In primo luogo si ha una graduale perdita di acqua evaporabile inizialmente presente; successivamente, a causa delle reazioni di deidratazione che si sviluppano nella pasta di cemento portland, l'acqua chimicamente legata viene gradualmente rilasciata, fino a diventare acqua libera, ovvero evaporabile. Il riscaldamento provoca, inoltre, dei cambiamenti nella porosità della pasta di cemento indurita. Anche gli aggregati perdono la loro acqua evaporabile, mentre gli inerti di natura calcarea sono sottoposti a decarbonatazione con espulsione di un'ingente quantità di gas di anidride carbonica.

I gradienti di pressione di vapore acqueo che si sviluppa nei pori in seguito al riscaldamento causano una diffusione dell'acqua evaporabile e dello stesso vapore. Sia le elevate pressioni nei pori che si sviluppano che le tensioni indotte dalle espansioni non uniformi di volume conducono a micro- e macro-fratture che, da un lato portano ad elevati aumenti della porosità del materiale (per temperature superiori ai 100° C), dall'altro possono causare lo spacco esplosivo del materiale.

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Per temperature superiori ai 100°C il comportamento del calcestruzzo impermeabilizzato differisce molto da quello del materiale stesso non impermeabilizzato: mentre il primo è dominato da reazioni e trasformazioni chimiche dettate dal comportamento termo-igrometrico, il secondo è ancora dominato dal processo di deidratazione (Khoury 2000).

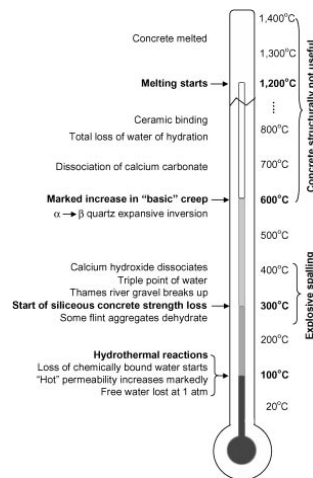


Figura 0-1 - Trasformazioni chimico-fisiche del calcestruzzo durante il riscaldamento.

4.1.1. Trasformazioni chimico-fisiche nella pasta di cemento

La pasta di cemento è sostanzialmente costituita da particelle di gel idrosilicatico (pori di gel) di natura porosa e di particelle cristalline (idrossido di calcio, alluminati idrati, carbonato di calcio) fra le quali sono disseminati i pori capillari.

L'aumento della temperatura provoca nella pasta di cemento delle modificazioni strutturali di natura chimica, fisica e chimico-fisica, i cui effetti si manifestano attraverso le modifiche di alcune proprietà della pasta cementizia quali la variazione dimensionale, la resistenza meccanica e la conducibilità termica.

La pasta di cemento è sostanzialmente costituita da particelle di gel idrosilicatico di natura porosa (pori del gel) e di particelle cristalline (idrossido di calcio, alluminati idrati, solfo alluminati idrati, carbonato di calcio) tra le quali sono disseminati i cosiddetti pori capillari. Sia i pori del

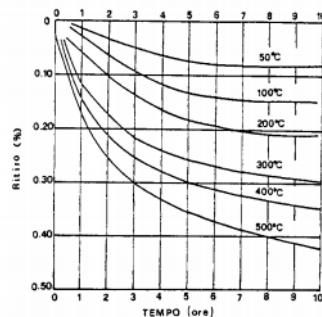
CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

gel, di dimensione compresa tra 10 e 300Å, che i pori capillari di dimensione notevolmente maggiore (0,001-10μ), sono solitamente pieni d'acqua. Se si aumenta la temperatura o si diminuisce l'umidità relativa, l'acqua fuoriesce da queste micro cavità provocando una contrazione del sistema. Prima viene eliminata l'acqua dai pori del gel dove le molecole di H₂O sono più tenacemente adsorbite dalla superficie delle particelle di gel idro-silicato. In generale, l'eliminazione di quest'acqua avviene già a temperatura ambiente se l'umidità relativa è sufficientemente bassa (meno del 90%) e l'effetto macroscopico sulla pasta, e quindi sul calcestruzzo, è quello ben noto del ritiro igrometrico.

Ovviamente, la fuoriuscita dell'acqua, e quindi il conseguente ritiro della pasta cementizia, è sensibilmente favorito dall'aumento della temperatura.

A temperature elevate, cioè maggiori di 120 °C, oltre all'acqua contenuta nei pori capillari e nei pori del gel, si verificano anche delle reazioni chimiche consistenti in disidratazione dei prodotti idratati del cemento.

L'eliminazione dell'acqua combinata dall'idrosilicato di calcio avviene per esempio nell'intervallo di 100-150°C, mentre quella dei solfoalluminati idrati si completa in più stadi a temperatura leggermente superiore (150°C-250°C). Alla temperatura di 450-500°C avviene la decomposizione dell'idrossido di calcio Ca(OH)₂, in ossido di calcio, CaO. Infine da 700°C a 1000°C, avviene la trasformazione del carbonato di calcio, CaCO₃ (eventualmente formatosi per carbonatazione all'aria dell'idrossido di calcio) in ossido di calcio. Qualora la carbonatazione all'aria non sia avvenuta, le reazioni di decomposizione termica terminano a 500°C con la disidratazione dell'idrossido di calcio. Per successivo innalzamento della temperatura, il materiale espande termicamente con un coefficiente che è nell'ordine di $10 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$.



CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Figura 0-2 - Ritiro di una pasta di cemento mantenuta alle alte temperature

Le considerazioni sopra riportate si riferiscono a condizioni di “quasi equilibrio”.

Nel grafico seguente è stata riportata la variazione dimensionale finale, consistente sempre in un ritiro, che si verifica con un riscaldamento relativamente lento. In pratica però, interessa maggiormente vedere l'effetto “dinamico” del riscaldamento, e cioè le variazioni dimensionali che si verificano durante l'incendio prima che si raggiunga un equilibrio termodimensionale finale. Si può notare che l'aumento di temperatura iniziale fino a circa 100°C, provoca un'espansione termica del materiale dovuta al fatto che la dilatazione termica è maggiore del ritiro provocato dall'evaporazione dell'acqua: cioè il materiale si riscalda con una velocità più elevata di quella con cui evapora l'acqua. Successivamente la disidratazione dovuta alle decomposizioni degli idrosilicati, dei solfoalluminati idrati e dell'idrossido di calcio è così imponente da prendere il sopravvento sull'espansione termica. Gli effetti di queste variazioni dimensionali, soprattutto se impediti, come si verifica in parte dentro il calcestruzzo, provocano tensioni tali da superare la resistenza a trazione del materiale e da generare quindi fessure nella pasta cementizia, scollamento tra aggregati e pasta, distacchi di materiale, ecc. In linea di massima gli effetti della temperatura sulla resistenza meccanica della pasta di cemento cominciano a divenire sensibili a temperature superiori a 500°C, ed a 600°C si possono ottenere perdite di resistenza meccanica anche del 50%. Dal punto di vista pratico è interessante osservare l'effetto della bagnatura della pasta di cemento durante e dopo il raffreddamento, e cioè in fase di estinzione o di ripristino della struttura: in presenza di acqua l'ossido di calcio, Ca(OH)_2 ed eventualmente di CaCO_3 .

Naturalmente questo aspetto del problema esiste nel calcestruzzo, indipendentemente dal tipo di cemento impiegato, qualora si siano utilizzati aggregati calcarei contenenti cioè carbonato di calcio. L'effetto del trattamento termico subito durante un incendio sulle proprietà della pasta di cemento si estende anche alla conducibilità termica. La pasta di cemento diviene termicamente meno conducibile alle alte temperature: l'effetto è probabilmente da attribuire alla formazione di pori vuoti durante il riscaldamento. Tuttavia, da un punto di vista pratico, la protezione delle sottostanti armature metalliche può essere seriamente

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

compromessa dal deterioramento della pasta cementizia presente del copriferro. Infatti, sebbene l'impasto di cemento divenga di per sé isolante, la formazione di fessure ed il distacco del materiale, entrambi provocati dalle variazioni dimensionali, creano di fatto condizioni più favorevoli alla trasmissione del calore verso l'interno della struttura, ed in particolare verso le armature.

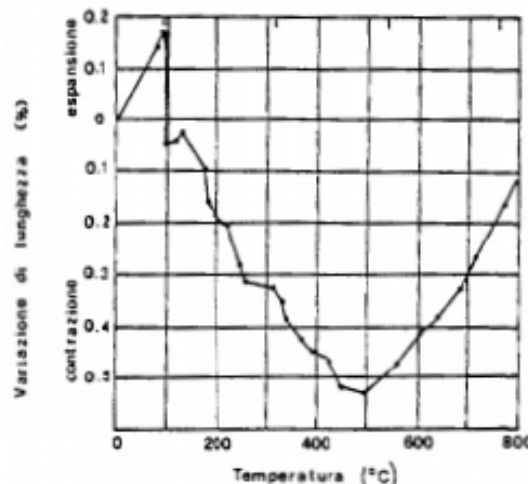


Figura 0-3 - Variazioni dimensionali di una pasta di cemento dopo il riscaldamento

4.1.2. Trasformazioni chimico-fisiche negli aggregati

Gli effetti delle alte temperature sugli aggregati dipendono sostanzialmente da quattro fattori:

- il coefficiente di espansione termica lineare;
- la conducibilità termica;
- la capacità termica;
- la presenza o meno di variazioni di stato in corrispondenza delle quali si verificano improvvisi cambiamenti di volume.

L'espansione termica lineare

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Gli aggregati che presentano un basso coefficiente di espansione termica lineare si comportano meglio, nei riguardi delle alte temperature, di quelli che hanno forti dilatazioni termiche. Con il crescere della temperatura, infatti, gli aggregati con maggiore coefficiente di espansione termica, sono soggetti a forti tensioni che possono causare fessurazione e disgregamento. Inoltre, poiché la pasta di cemento indurita si contrae alle alte temperature, più bassa è la dilatazione termica degli aggregati, minori sono gli sforzi di contrasto fra i due materiali e minori sono, quindi, le tensioni cui essi sono sottoposti.

Il coefficiente di espansione termica degli aggregati cambia con il crescere della temperatura. Nella Tabella seguente sono riportati i valori minimi e massimi di tale coefficiente per le rocce da cui più comunemente si ricavano gli inerti per calcestruzzi

Tipo di roccia	Coefficiente di espansione termica lineare ($\cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Granito	1,8 ÷ 11,9
Diorite, Ardesite	4,1 ÷ 10,3
Gabbro, Basalto, Diabase	3,6 ÷ 9,7
Arenaria	4,3 ÷ 13,9
Dolomite	6,7 ÷ 8,6
Calcarea	0,9 ÷ 12,2
Selce	7,4 ÷ 13,1
Marmo	1,1 ÷ 16,0
Quarzite	>10

TABELLA 1 - Coefficiente di espansione termica lineare di vari tipi di roccia

Conducibilità e capacità termica

La conducibilità e la capacità termica degli aggregati giocano un ruolo importante alle alte temperature, poiché esse indicano la capacità che gli aggregati hanno da assorbire il calore e di dissiparlo. Gli aggregati calcarei

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

o dolomitici, per esempio, rallentano l'avanzata della temperatura all'interno della massa a causa del calore che essi assorbono tra 700 e 900 °C per essere trasformati in ossido di calcio o magnesio. Il calore assorbito è di 430 cal/g per la decomposizione del carbonato di calcio e di 340 cal/g per il carbonato di magnesio. Il calore assorbito è di 430 cal/g per la decomposizione del carbonato di calcio e di 340 cal/g per il carbonato di magnesio. In questo modo viene assorbito del calore che altrimenti agirebbe sulla massa del calcestruzzo. Questi aggregati a causa della loro decomposizione, aumentano la resistenza al fuoco della struttura, arrestando la salita della temperatura.

Da questo punto di vista anche gli aggregati leggeri, capaci di assorbire e di trattenere una parte dell'acqua di impasto nella loro struttura porosa, sono capaci di assorbire una notevole quantità di calore per evaporare l'acqua assorbita.

I diagrammi seguenti mostrano la conducibilità termica alle diverse temperature di alcuni aggregati naturali. Si osserva che per tutti gli aggregati l'aumento della temperatura fa diminuire la conducibilità termica. Poiché anche la pasta di cemento diviene meno conducibile all'aumentare della temperatura, ne consegue che anche il calcestruzzo diviene termicamente più isolante alle temperature più elevate.

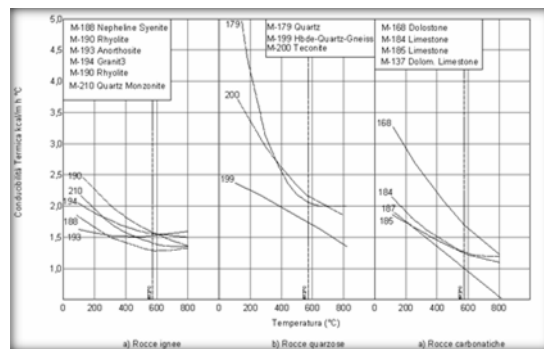


Figura 0-4 - Effetti della temperatura sulla conducibilità termica di alcune rocce

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

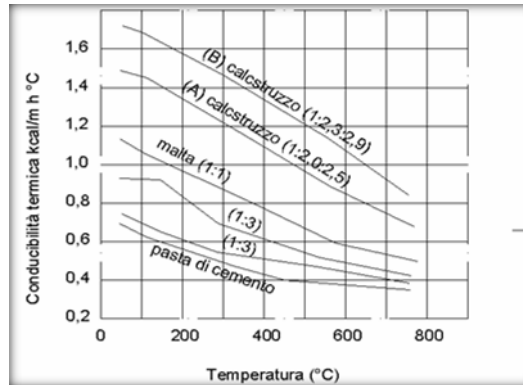


Figura 0-5 - Effetti della temperatura sulla conducibilità termica della pasta di cemento

Le trasformazioni di stato

Il quarzo, che è il principale minerale delle sabbie silicee e di moltissime ghiaie, e che è presente in apprezzabili proporzioni in molte rocce ignee, presenta una trasformazione cristallina, a 573 °C, da una modificazione più densa (quarzo α) ad una più leggera (quarzo β) accompagnata da una brusca espansione di circa 0,85%. Per questo motivo i calcestruzzi contenenti aggregati ricchi di quarzo sono da considerare tra i meno resistenti al fuoco, perché presentano una grande tendenza a distaccarsi a causa dell'azione dirompente del quarzo.

Anche nell'arenaria è presente il quarzo sotto forma di microcristalli cementati da altri minerali che si ritirano per decomposizione termica e che controbilanciano in parte l'espansione del quarzo. A causa di ciò, l'impiego delle arenarie nei calcestruzzi non è così deleterio come quello di altri aggregati quarzosi nei confronti del fuoco.

Nelle rocce calcaree e dolomitiche si verifica una espansione termica a circa 900°C, cui segue una concentrazione a causa della trasformazione dei carbonati nei corrispondenti ossidi. L'effetto, soprattutto nei calcari molto densi, è comunque trascurabile per l'elevata temperatura a cui si verifica ed interessa solitamente le parti superficiali del calcestruzzo più esposte all'azione del fuoco.

4.1.3. Il contenuto di umidità nel calcestruzzo

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

L'umidità contenuta nel calcestruzzo, ed in particolare nella pasta di cemento, per effetto delle alte temperature, tende a salire in superficie e quindi ad evaporare assorbendo calore. La temperatura della superficie viene così ad essere mantenuta sui 100°C fino a che l'acqua non sia tutta evaporata. Ovviamente questa azione benefica può esplicarsi fino a che la salita di temperatura non sia tanto rapida da provocare una brusca evaporazione dell'acqua all'interno del calcestruzzo. In questo caso, possono verificarsi scoppi e distacchi di materiale perché la pressione del vapore contenuta nel calcestruzzo può superare improvvisamente la resistenza a trazione del materiale. In altre parole la presenza di acqua non combinata nella pasta di cemento fa aumentare la resistenza al fuoco nel caso che l'acqua stessa possa fuoriuscire lentamente dalla pasta di cemento. In tal caso, oltre al beneficio assorbito verificherebbe anche un struttura con legami più forti tra le particelle di cemento idratato e quindi si formerebbe una pasta di cemento meccanicamente più resistente. Nel caso in cui, invece, l'evaporazione dell'acqua avvenga senza che contemporaneamente si verifichi una fuoriuscita graduale dell'acqua stessa, l'effetto sulla resistenza meccanica risulta essere negativo.

4.2. Classificazione degli inerti

Sulla base della loro resistenza al fuoco, Ingberg ha classificato gli aggregati per calcestruzzo in quattro gruppi con resistenza al fuoco decrescente dal I al IV gruppo:

- **I GRUPPO:** aggregati calcarei, comprendenti calcari e dolomie che si trovano in molti aggregati frantumati, che come costituenti pietre naturali o ghiaie. Essi presentano un'espansione termica medio-bassa ma soprattutto sono capaci di assorbire una notevole quantità di calore prima di decomporsi a circa 900°C;
- **II GRUPPO:** aggregati silicatici non quarzosi, composti soprattutto da feldspati, olivine, anfiboli e pirosseni come l'orneblenda e l'augite che non manifestano fessurazioni o sgretolamento superficiale alla prova al fuoco. Questi aggregati includono molte rocce comuni come basalti e diabasi (trachiti), ardesiti, gabbri e sieniti. Inoltre pomice e aggregati artificiali come mattoni rotti, argille e scisti espansi, loppe d'altoforno e le varietà più dure di clinker o ceneri volanti, con punto di fusione di 1150 – 1260 °C.

- **III GRUPPO:** aggregati che alle prove al fuoco manifestano fessurazioni e sgretolamento superficiali. Si tratta di rocce ignee quarzose che hanno un contenuto di silice libera più alto dei gruppi 1 e 2.

Fanno parte di questo gruppo i graniti, composti di quarzo, feldspati e minerali ferro magnesiaci, insieme con l'arenaria, quarzite, scisti e gneiss contenenti quarzo;

- **IV GRUPPO:** comprende rocce che consistono prevalentemente di silice non combinata sotto forma di quarzo e cioè quarzite, quarzo e selce che causano fessurazioni, sgretolamento e distruzione del calcestruzzo a profondità di 2-3 cm ed oltre al di sotto della superficie.

Gli aggregati leggeri, come argille e scisti espansi, abbiano una buona resistenza al fuoco a causa della bassa conducibilità termica, e della loro stabilità chimico-fisica alle alte temperature, dovuta al fatto di essere già stati trattati a temperature relativamente elevate, più di 1000°C.

Essi, pur avendo di per sé una bassa capacità termica, assorbono un'apprezzabile quantità di calore per l'evaporazione dell'acqua contenuta nei loro pori.

4.3. Effetto delle alte temperature sul calcestruzzo

Nei paragrafi precedenti sono stati esaminati gli effetti del riscaldamento provocato da un incendio sui componenti del calcestruzzo ed in particolare sulla pasta di cemento, sulla sua umidità e sugli aggregati. Nei paragrafi che seguono saranno discussi i risultati concernenti gli effetti delle alte temperature sulle proprietà del calcestruzzo.

4.3.1. Andamento della resistenza a compressione

L'esperienza mostra un'iniziale perdita "apparente" di resistenza a compressione, fino a raggiungere un minimo per temperature intorno agli 80°C, per calcestruzzi non impermeabilizzati. Tale perdita, largamente recuperabile in seguito al raffreddamento, si deve ad un indebolimento delle forze di van der Waals causato dall'espansione delle molecole d'acqua che spingono maggiormente lontano le lamelle di C-S-H. Come si è già specificato, tuttavia, tale minimo non compare nelle rappresentazioni delle resistenze residue (ottenute per misurazioni successive al raffreddamento dei provini). Sovente la resistenza a

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

compressione è mostrata crescente fino a temperature comprese tra i 200-300°C e decrescente per temperature superiori.

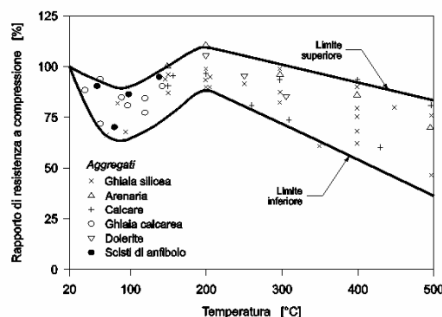


Figura 0-6 - Resistenza per calcestruzzi confezionati con cemento portland ed aggregati convenzionali in funzione della temperatura

Tale decadimento dipende non solo dal tipo di aggregato, ma anche dal mix design.

Tuttavia, seppur con un giudizioso mix design del materiale il progettista possa agire positivamente sull'influenza negativa che le alte temperature esercitano sulle proprietà dello stesso, evidenze sperimentali hanno mostrato un marcato aumento della viscosità di base (basic creep) per temperature prossime ai 600°C, limite così imposto per l'utilizzo del calcestruzzo quale materiale strutturale (Khoury 2000).

Fortunatamente, a causa della bassa diffusività termica del materiale, solo gli strati molto vicini alla faccia esposta al riscaldamento (una porzione di pochi centimetri) presentano temperature superiori ai 300°C. La normale pratica prevede di rimuovere unicamente tali strati e di sostituirli con del materiale integro in un tempo successivo all'incendio. Durante l'incendio, infatti, essi, nonostante abbiano perso la propria funzione strutturale, se non si distaccano dalla faccia dell'elemento, continuano a garantire un'adeguata protezione per le barre di armatura e per il calcestruzzo più interno, comportandosi come una vera e propria barriera.

Un aspetto sempre poco apprezzato dai progettisti riguarda la sostanziale differenza di comportamento tra calcestruzzi impermeabilizzati e non, per temperature superiori ai 100°C. Mentre per i primi il processo determinante riguarda il comportamento termoigrometrico del materiale e, in particolare, le trasformazioni fisico-chimiche per i secondi il processo dominante è, semplicemente, relativo alla perdita di massa,

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

dovuta alla fuoriuscita dei fluidi presenti (acqua liquida, vapor d'acqua, aria secca). Detto ciò, dato il gran numero di materiali e di fattori ambientali che influenzano la resistenza a compressione, non deve sorprendere l'enorme varietà di risultati (alcuni addirittura apparentemente contraddittori) ottenuti per prove di resistenza a compressione monoassiale a 150°C.

4.3.1.1. Il rapporto acqua/cemento

La diminuzione percentuale della resistenza a compressione, in seguito al trattamento termico, è influenzata dal rapporto acqua/cemento. La tendenza è quella di realizzare calcestruzzi aventi un basso rapporto acqua/cemento.

Di seguito è riportato il confronto fra due calcestruzzi realizzati con lo stesso inerte siliceo ma diversi rapporti acqua/cemento.

Il calcestruzzo di tipo B, avente una resistenza iniziale minore del tipo A è stato additivato un riduttore di acqua. Entrambe le tipologie sono state sottoposte a trattamenti termici a 500-750-1000°C. Il comportamento a 500°C è praticamente uguale per A che per B, infatti dopo circa due ore di esposizione si registra un calo di resistenza, di circa il 10% rispetto al valore iniziale. Tuttavia dopo la perdita iniziale il valore della resistenza si stabilizza per tutta la durata della prova.

Comportamento del tutto differente invece si verifica nel caso dei trattamenti a 750°C e 1000°C nei quali si assiste ad una significativa riduzione della caratteristica meccanica durante tutto il tempo di riscaldamento.

Il tali casi però, un ruolo fondamentale, è rivestito appunto dal rapporto acqua cemento.

Nel calcestruzzo contenente l'additivo, dopo 30 minuti di esposizione, la resistenza meccanica è sensibilmente maggiore rispetto a quella misurata nel calcestruzzo senza additivo, avente quindi un rapporto acqua cemento più alto.

Comportamento simile è stato registrato nel caso in cui il calcestruzzo fosse stato realizzato con inerte calcareo Fig. 51.

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

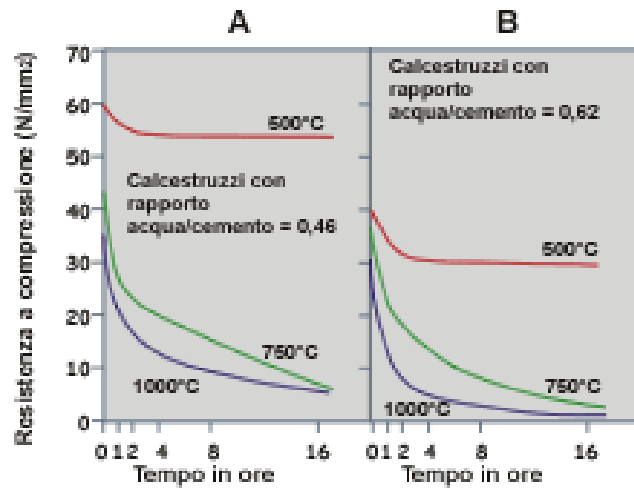


Figura 0-7 - Influenza del tempo di riscaldamento sulla resistenza a compressione di calcestruzzi confezionati con inerti silicei e con diversi rapporti acqua/cemento (A) con additivo riduttore di acqua - (B) senza additivo

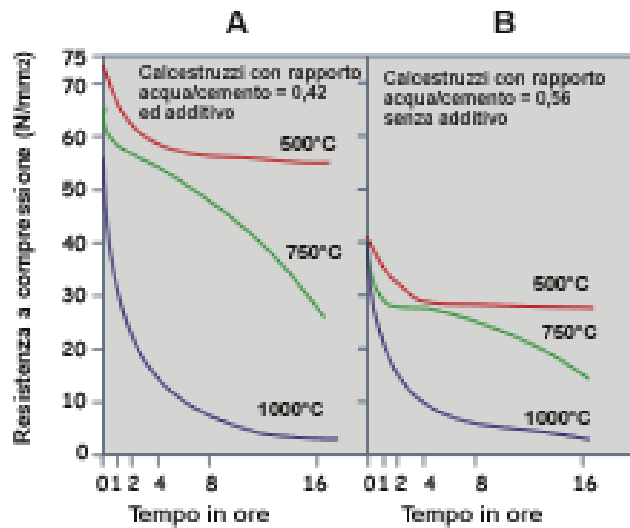


Figura 0-8 - Influenza del tempo di riscaldamento sulla resistenza a compressione di calcestruzzi confezionati con inerti calcarei e con diversi rapporti acqua/cemento (A) con additivo riduttore di acqua - (B) senza additivo

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Tuttavia visto il minor coefficiente di conducibilità posseduto dall'aggregato calcareo rispetto a quello siliceo, a parità di composizione del calcestruzzo si è rilevato che dopo un riscaldamento di 750 °C, la resistenza meccanica diminuisce del 25% per calcestruzzi preparati con inerti calcarei e del 45% (quasi il doppio) per quelli silicei.

4.3.1.2. La natura dell'inerte

La natura dell'inerte influenza in modo sensibile il calcestruzzo ed in particolare la sua resistenza meccanica. In figura si mostra la perdita di resistenza a compressione espressa in percentuale rispetto al valore iniziale.

I calcestruzzi confezionati con inerti calcarei offrono una maggiore resistenza al fuoco in quanto non subiscono apprezzabili diminuzioni di resistenza meccanica se non oltre i 750°C ovvero in prossimità della decomposizione termica del calcare in calce e anidride carbonica. Ma occorre comunque far notare che durante la carbonatazione, pur registrandosi una brusca perdita di resistenza, viene assorbita una notevole quantità di calore destinata alla decomposizione del calcare quindi si attenua l'innalzamento della temperatura negli starti sottostanti di calcestruzzo.

I calcestruzzi calcarei come quelli leggeri (argilla espansa e sabbia) in prossimità dei

750°C perdono il 25% della resistenza a compressione iniziale mentre quelli silicei, registrano un calo di resistenza triplo rispetto ai primi

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

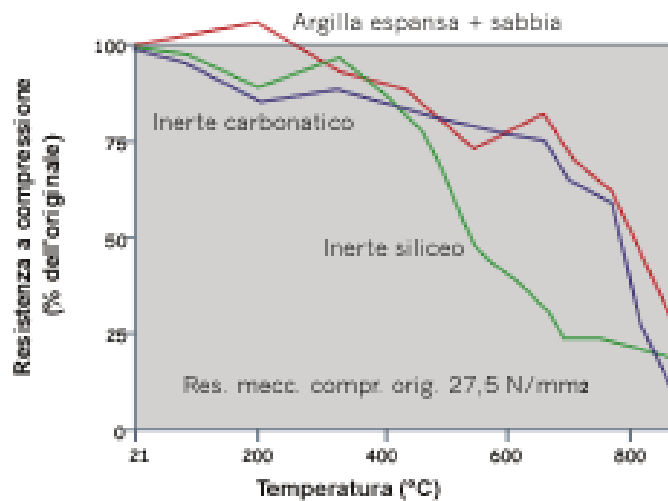


Figura 0-9 - Effetto del tipo di inerte sulla resistenza meccanica a compressione misurata durante il riscaldamento

4.3.1.3. La lavorabilità e la posa in opera

La lavorabilità del calcestruzzo e la relativa messa in opera sono fattori che influiscono pesantemente sulla compattezza e sulla omogeneità del calcestruzzo indurito. Lo studio effettuato a tal proposito per calcestruzzi a temperatura ambiente evidenzia come le caratteristiche meccaniche vengano significativamente abbattute quando si ha a che fare con calcestruzzi scarsamente compattati. In assenza di analisi sperimentali dedicate a questo aspetto nel caso di trattamenti termici, è lecito supporre che la mancata compattazione e l'eterogeneità del materiale provochino, un forte decadimento delle prestazioni.

A livello fisico-chimico la non omogeneità del materiale induce nel materiale una diversa trasmissione termica ma soprattutto un differente coefficiente di dilatazione termica. L'aspetto più significativo è proprio definito dalla presenza di un coefficiente di dilatazione differente da punto a punto che provoca un forte stato tensionale all'interno del materiale. Inoltre la cattiva compattazione fa sì che la densità all'interno del materiale non sia costante ovvero si possono osservare accumuli di inerti, presenza di cavità d'aria o d'acqua fra essi.

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

La presenza di cavità, nel caso di calcestruzzi armati, è particolarmente pericolosa.

Infatti i fumi dell'incendio, caratterizzati evidentemente dal alte temperature, entrano all'interno delle cavità propagandosi nel materiale fino ad arrivare all'acciaio di armatura il quale avendo un coefficiente di conduttività termica trenta volte superiore a quello del calcestruzzo raggiunge in tempi veloci temperature elevate le quali compromettono seriamente le loro capacità di resistenza. È noto che in seguito al cedimento delle armature la struttura collassi.

Si deve quindi fare in modo di realizzare dei calcestruzzi ben compattati ed omogenei.

Per far ciò sarebbe importante progettare una miscela calcestruzzo molto fluido caratterizzata cioè da un elevato rapporto acqua/cemento ma è stato dimostrato come le caratteristiche meccaniche con particolare riferimento a quella di compressione, migliorino con la diminuzione di tale rapporto. Volendo valutare entrambe gli aspetti si giunge ad un controsenso, infatti, al diminuire dell'acqua di impasto diminuisce anche la lavorabilità con le relative difficoltà di compattazione. Per superare ciò si può agire in due modi: o si stabilisce il rapporto acqua/cemento tale da realizzare certe proprietà richieste e di conseguenza si realizza un opportuno sistema di messa in opera oppure si fissa il sistema di messa in opera e in relazione a questo si fissa un opportuno rapporto acqua/cemento. Si osserva che operando con quest'ultimo criterio risultano fissate le caratteristiche meccaniche, di ciò si dovrà ovviamente tener conto in fase progettuale.

4.3.1.4. Il carico applicato

Le valutazioni fatte fino ad ora non tengono in conto che, nella realtà, il calcestruzzo è sempre sottoposto a sollecitazione meccanica, sia che essa sia costituita semplicemente dal peso proprio che da altre azioni di tipo accidentale e talvolta coattivo.

In Fig. 53 si riportano gli andamenti della resistenza in funzione della temperatura per un calcestruzzo realizzato con inerte calcareo.

La curva rossa è relativa ad un calcestruzzo scarico e rotto caldo. La curva verde simula il comportamento di un calcestruzzo caricato con il 40% della resistenza meccanica iniziale rotto a caldo per compressione mentre la curva blu è rappresentativa di calcestruzzi rotti a freddo

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

(conservati per 7 giorni a temperatura ambiente dopo essere stati sottoposti a sollecitazione termica).

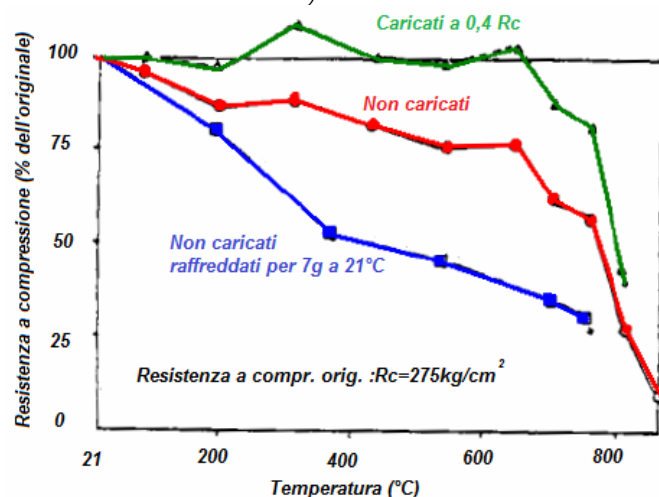


Figura 0-10 - Effetto del carico applicato sulla resistenza meccanica di calcestruzzi realizzati con inerti di tipo calcareo trattati ad alte temperature

Si osserva come la resistenza residua a freddo (blu) sia di gran lunga inferiore rispetto a quella a caldo sia che esse venga comparata con quella del calcestruzzo carico che scarico. Interessante è notare che l'azione termica su un calcestruzzo sollecitato meccanicamente provoca un aumento di resistenza a compressione, questa si mantiene ai valori iniziali o addirittura migliori fino a ben 600°C raggiunti i quali cala bruscamente fino al collasso del calcestruzzo. invece per un calcestruzzo non caricato la resistenza cala di un 25% con andamento abbastanza lineare e fino a 600°C per poi comportarsi come nel caso precedente. La repentina perdita di resistenza in corrispondenza dei 600°C, che sia presente o no il carico, è dovuta alla decomposizione termica del carbonato di calcio.

Si conclude affermando che l'effetto della temperatura sulla resistenza meccanica, soprattutto se misurata a temperatura ambiente, risulta più dannosa, di quanto in realtà si verifica per la presenza contemporanea di carico e temperatura.

4.3.2. La resistenza meccanica a trazione

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Partendo dal presupposto che la resistenza a trazione del calcestruzzo a trazione in condizioni di temperatura ambientali è circa 1/10 rispetto a quella a compressione è lecito supporre che il trattamento termico induca nella resistenza trazione effetti più marcati rispetto a quella di compressione. Il grafico seguente conferma tale ipotesi

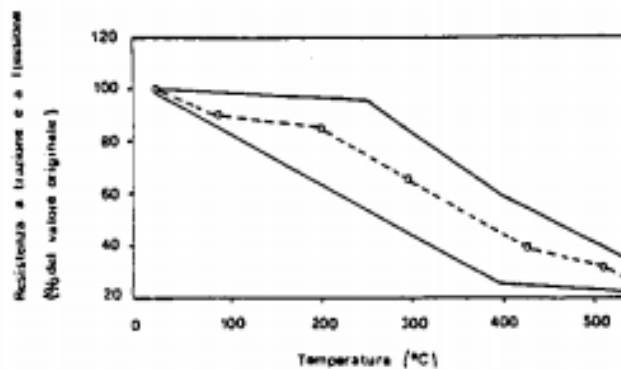


Figura 0-11 - Effetto delle alte temperature sulla variazione percentuale della resistenza a trazione e a flessione del calcestruzzo

La curva tratteggiata si riferisce ai valori medi mentre le curve superiore ed inferiore si riferiscono ai valori massimi e minimi ottenuti rispettivamente in condizioni di raffreddamento lento (con bassa umidità relativa nel calcestruzzo) ed in condizioni di raffreddamento brusco (con notevole umidità la cui fuoriuscita viene impedita durante il riscaldamento).

L'influenza delle alte temperature sulla resistenza a trazione è più marcata rispetto a quella sulla resistenza a compressione. Infatti in prossimità di 500°C la perdita di resistenza compressione viene stimata intorno al 20-40% rispetto al valore iniziale mentre per quella a trazione si parla di perdite dell'ordine dell'80% sempre in riferimento ai valori iniziali definiti alla temperatura ambiente. Il differente comportamento probabilmente è da imputare al fatto che già a temperature inferiori ai 500°C si aprono delle fessure che evidentemente hanno un effetto maggiormente dannoso sulla trasmissione degli sforzi trazione che non su quelli di compressione.

4.3.3. Il modulo elastico

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Anche nel caso di modulo elastico del grafico di figura la curva tratteggiata si riferisce ai valori medi mentre le curve superiore ed inferiore si riferiscono ai valori massimi e minimi ottenuti rispettivamente in condizioni di raffreddamento lento ed in condizioni di raffreddamento brusco.

La variazione del modulo elastico con la temperatura è del tutto analoga a quella che si registra per la resistenza a trazione con la differenza che la diminuzione del modulo, risente più della resistenza trazione e compressione, del dosaggio di cemento e del rapporto acqua/cemento. In particolare, analisi sperimentali hanno dimostrato che quando il calcestruzzo è realizzato con alto dosaggio di cemento e basso rapporto acqua/cemento, il suo modulo elastico è meno influenzato dal trattamento termico (curva superiore)

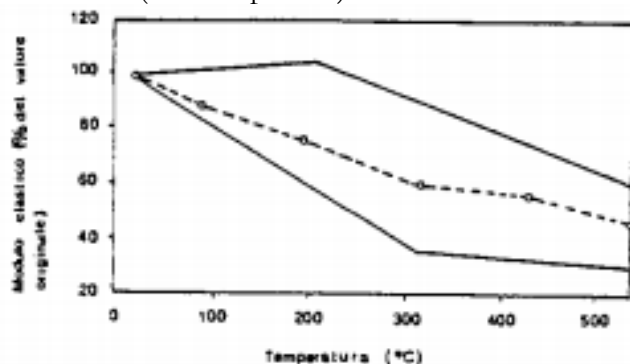


Figura 0-12 - Effetto delle alte temperature sul modulo elastico del calcestruzzo

4.3.4. Dilatazione termica del calcestruzzo

Come tutti i solidi soggetti a riscaldamento anche il calcestruzzo è caratterizzato da un'espansione termica, pressoché costante in tutte le direzioni, potendo assumere, con buona approssimazione, che il materiale sia isotropo. L'espansione termica comporta degli effetti rilevanti sulle strutture in calcestruzzo. A seguito della non uniformità di temperatura nasce, infatti, una distribuzione di sforzi che è, in generale, non uniforme, cui vanno ad aggiungersi i problemi dovuti alle differenze di espansione tra la pasta di cemento indurita e gli aggregati che, se particolarmente significative, possono causare delle microtensioni e, quindi, danneggiare la struttura interna del calcestruzzo stesso.

Di seguito si commenteranno dapprima singolarmente la pasta di cemento indurita e gli aggregati, poi il materiale composito.

4.3.4.1. Espansione termica della pasta di cemento

Molti ricercatori hanno analizzato i cambiamenti di lunghezza della pasta di cemento portland indurita al variare della temperatura: inizialmente la pasta di cemento indurita si espande con il riscaldamento fino a circa 150°C e la massima deformazione è nell'ordine dello 0,2%.

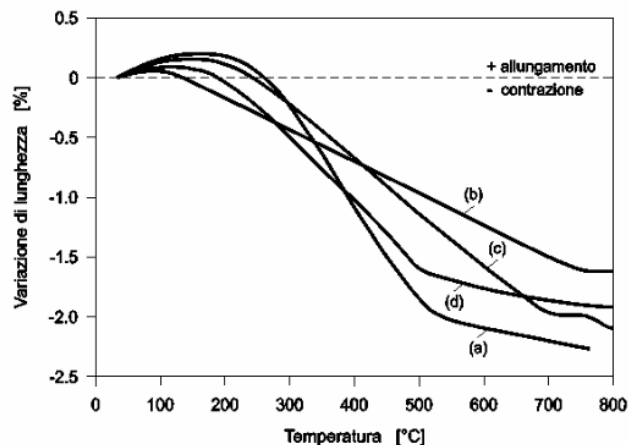


Figura 0-13 - Variazione di lunghezza nei provini confezionati con cemento portland al variare della temperatura: a) Philleo 1958; b) Harada et al. 1972; c) Cruz e Gillen 1980; d) Crowley 1956

Successivamente, tra 150 e 300°C, non si segnala nessuna ulteriore espansione, mentre, a partire da 300°C, è possibile addirittura osservare una contrazione della pasta indurita, condizionata quasi esclusivamente dalla perdita di acqua, sia quella evaporabile che quella chimicamente combinata all'interno del gel di cemento; a 800°C il ritiro varia tra l'1,6 ed il 2,2 %.

La contrazione, dunque, è in continuo conflitto con l'espansione termica ma, fino a circa 300°C, è quest'ultima ad avere la meglio. Alle alte temperature, invece, la dilatazione viene di gran lunga superata dalla contrazione, portando così la pasta di cemento ad una complessiva diminuzione di volume.

Questa simultanea competizione tra espansione e contrazione è una caratteristica che non può essere trascurata parlando di deformazioni termiche, vista la notevole influenza sulla microstruttura della pasta di

cemento indurita e, di conseguenza, sulle sue proprietà fisiche e meccaniche.

4.3.4.2. Espansione termica degli aggregati

Gli aggregati occupano, generalmente, tra il 65 e l'80 % del volume totale del calcestruzzo e, pertanto, hanno un effetto molto importante sul cambiamento di volume che si verifica a seguito dell'esposizione alle alte temperature. Nei calcestruzzi ordinari, gli aggregati, una volta riscaldati, sono caratterizzati generalmente da una espansione ed il coefficiente medio di dilatazione termica varia tra $5,5 \cdot 10^{-6}$ a $11,4 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$ a seconda del tipo di roccia impiegata nell'impasto.

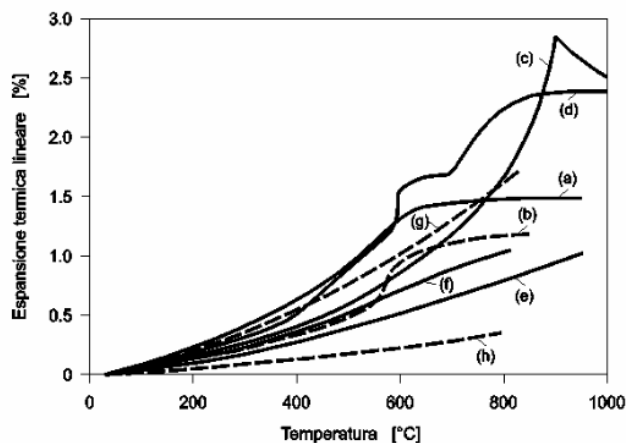


Figura 0-14 - Dilatazione termica lineare di varie rocce con la temperatura: a) e b) arenaria;

c) calcare; d) granito; e) anortosite; f) basalto; g) calcare; h) pomice.

Il principale fattore in grado di influenzare il coefficiente α è rappresentato dalla percentuale in peso di silicio presente all'interno della roccia (Griffiths 1936). In questo modo rocce ad alto contenuto di silicio, come ad esempio la quarzite e l'arenaria, possono avere un coefficiente di espansione medio compreso tra $9 \cdot 10^{-6}$ e $10 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$, mentre materiali a contenuto modesto o addirittura nullo di silice, come il calcare, raggiungono i valori più bassi, in media circa $5,5 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$.

Nonostante il coefficiente di dilatazione termica sia strettamente collegato alla classe geologica di appartenenza, anche all'interno di ciascun gruppo omogeneo, il campo dei possibili valori di α può variare

più o meno considerevolmente, vista la natura anisotropa di molte rocce. I minerali anisotropi presentano, infatti, una dilatazione lineare diversa nelle varie direzioni a seconda dell'orientazione dei cristalli presenti al loro interno. Non va poi dimenticato sia il contenuto di umidità della roccia che la possibilità di avere a che fare con minerali amorfi o cristallini.

Osservando il diagramma in cui è riportata l'espansione termica lineare per diverse rocce tra i 25 e i 1000°C, si può facilmente notare come il coefficiente α per le rocce, solitamente, non sia proporzionale alla temperatura ed, in genere, l'espansione è marcatamente più elevata alle temperature alte, rispetto a quanto avviene per temperature basse.

4.3.4.3. Espansione termica del calcestruzzo

Il coefficiente di dilatazione termica per il calcestruzzo a temperature normali, ad esempio fra 0 e 40°C, è influenzato da molti fattori, primo fra tutti il tipo degli aggregati impiegati nella miscela.

Esiste, infatti, una relazione lineare tra i coefficienti di espansione termica dei più comuni aggregati e dei calcestruzzi con essi confezionati.

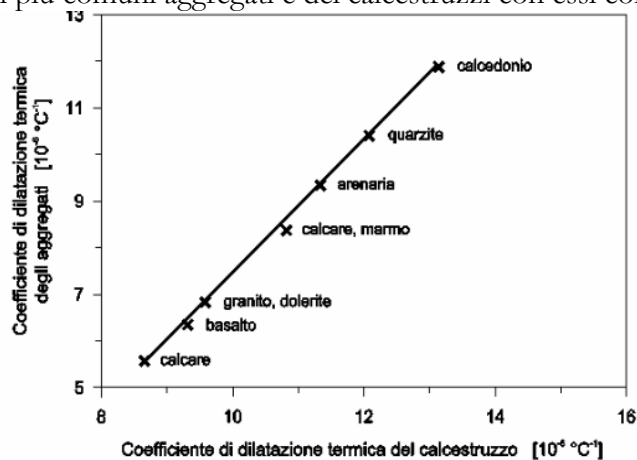


Figura 0-15 - Correlazione tra coefficienti di dilatazione termica dell'aggregato e del Calcestruzzo

È opportuno osservare, poi, come i calcestruzzi confezionati con aggregati silicei presentino un coefficiente di dilatazione α , più elevato rispetto a quelli confezionati con aggregati calcarei, che presentano,

invece, i più bassi, mentre quelli confezionati con aggregati ignei mostrano valori intermedi a questi ultimi due.

Le indagini condotte da Bonnel e Harper (1951), Meyers (1950), Mitchell (1953) hanno, inoltre, permesso di capire come la pasta di cemento portland, a temperature normali, abbia un coefficiente di dilatazione termica più elevato rispetto a quello degli aggregati convenzionalmente utilizzati nel confezionamento. Ne risulta, quindi, che il calcestruzzo ha un valore di α più alto rispetto a quello degli aggregati e aumenta nelle miscele più ricche di cemento.

Molti ricercatori hanno poi misurato la dilatazione termica del calcestruzzo per temperature fino ai 1200°C. Un esempio della relazione fra le elevate temperature e l'espansione termica del calcestruzzo confezionato con aggregati convenzionali è riportata in Figura Fig. 5.3.4.3.II (Schneider 1982). Come si può notare, l'espansione generalmente aumenta con la temperatura nonostante la contrazione della pasta di cemento indurita a temperature maggiori di 150-300°C.

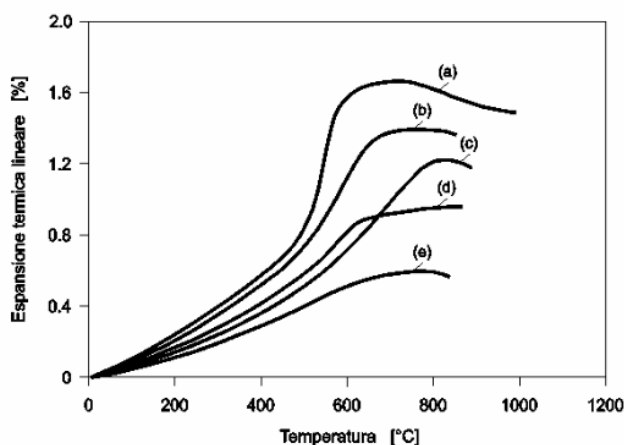


Figura 0-16 - II Dilatazione termica lineare di calcestruzzi confezionati con varie tipologie di aggregati convenzionali in funzione della temperatura (adattato da Schneider 1982): (a) quarzite; (b) arenaria; (c) calcare; (d) basalto; (e) loppa espansa.

L'espansione degli aggregati, infatti, è solitamente maggiore rispetto alla contrazione della pasta di cemento ed il risultato finale è la dilatazione del calcestruzzo. È altresì chiaro come l'espansione del calcestruzzo rimanga principalmente influenzata dal tipo di aggregati impiegati. A

600°C l'espansione del calcestruzzo con aggregati silicei è, per esempio, il doppio di quella del calcestruzzo con aggregati calcarei.

Molti calcestruzzi terminano la loro espansione oltre i 600-800°C e, in alcuni casi, una volta raggiunte tali temperature, il calcestruzzo inizia a contrarsi a causa dei cambiamenti chimico-fisici che avvengono negli aggregati e nella pasta di cemento indurita.

Per ultimo, è importante sottolineare come il calcestruzzo, una volta esposto ad elevate temperature, non sia più in grado di ritornare alla lunghezza iniziale per mezzo di un successivo raffreddamento: ciò significa che è dimensionalmente instabile.

Realizzando un ciclo termico, infatti, si può osservare come le curve ottenute durante il riscaldamento ed il raffreddamento non siano le stesse e che, mentre, per il calcestruzzo confezionato con aggregati silicei si ha un'espansione residua, per quello confezionato con aggregati scistosi, ad esempio, si ha una contrazione residua; questi valori finali sono dovuti ai cambiamenti chimici e fisici irreversibili che hanno luogo durante il riscaldamento.

4.4. Effetto delle alte temperature sull'acciaio

L'acciaio è un materiale notevolmente più riproducibile ed omogeneo del calcestruzzo.

Ciò è dovuto principalmente ai numerosi controlli a cui è sottoposto in fase di produzione sia per il numero limitato, sempre in relazione al calcestruzzo, di parametri che intervengono nella modifica delle sue proprietà. Se si considerano questi aspetti è facile intuire come il comportamento alle alte temperature sulle caratteristiche meccaniche dell'acciaio sia noto e definito in ogni piccolo dettaglio.

La risposta dell'acciaio alla sollecitazione termica è descrivibile principalmente in relazione alla seguente fenomenologia:

- Riduzione della resistenza allo snervamento;
- Riduzione della resistenza a rottura;
- Riduzione del modulo elastico.

4.4.1 La resistenza a trazione e il carico di snervamento

Una significativa rappresentazione del comportamento dell'acciaio alle alte temperature è data dai diagrammi seguenti. In essi si modella il comportamento sperimentale del legame tensione-deformazione di un

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

campione di acciaio al variare della temperatura; per deformazioni comprese fra 0 e 2% in Fig. 60 e per deformazioni comprese fra 0 e 20% in Fig. 61. Le tensioni sono normalizzate alla tensione di snervamento a temperatura ambiente.

Nel diagramma di Fig. 60 si nota che il legame σ - ϵ all'aumentare della

temperatura perde la sua forma tipica bilatera con il tratto orizzontale e assume la forma di parabola. La tensione di snervamento decresce all'aumentare della temperatura ma risente fortemente dell'aumento di deformazione. Infatti per deformazioni pari al 2% la tensione di snervamento per temperature non superiori a 400°C è uguale alla tensione di snervamento a temperatura ordinaria.

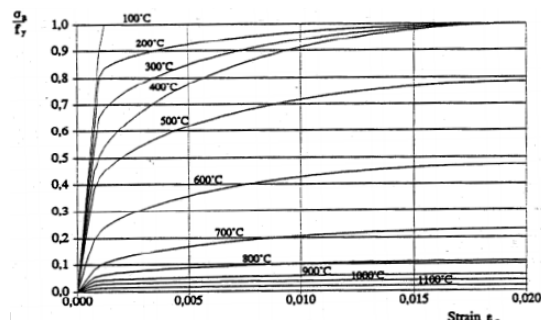


Figura 0-17 - Evoluzione del legame σ - ϵ dell'acciaio, per deformazioni comprese fra

0, 2%, all'aumentare della temperatura di esposizione

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

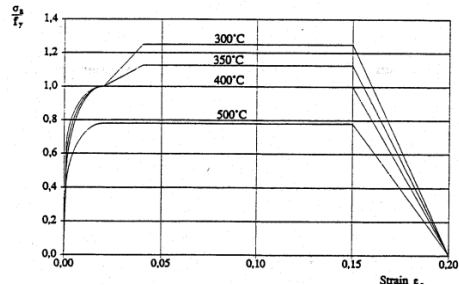


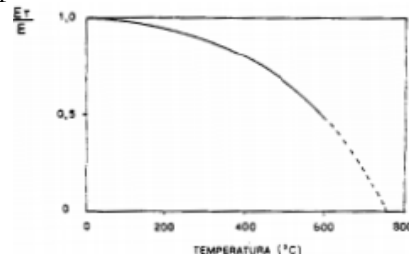
Figura 0-18 - Evoluzione del legame σ - ϵ dell'acciaio, per deformazioni comprese fra

0-20%, all'aumentare della temperatura di esposizione

Nel diagramma Fig. 61 nel campo di deformazioni superiori al 2%, si nota che, con temperature inferiori a 400°C, è possibile incorrere in fenomeni di incrudimento dell'acciaio che producono addirittura incrementi della tensione di snervamento. È possibile quindi affermare che per qualsiasi temperatura il campione di acciaio, raggiunga la massima tensione di snervamento a deformazioni maggiori al 2%. Tale deformazione, inaccettabile per la progettazione a temperatura ordinaria, può essere invece ritenuta accettabile per la verifica della capacità portante in caso d'incendio in quanto non pone limiti alla deformazione dell'acciaio prima del collasso.

4.4.2. Il modulo di elasticità

Si mostra in Fig. 5.4.2.I. l'influenza della temperatura sul modulo elastico E_T normalizzato rispetto al modulo E misurato a 0°C.



Effetto della temperature sul modulo elastico dell'acciaio

4.4.3. La dilatazione termica

Si mostra di seguito la variazione della dilatazione termica $\Delta L/L$ in

funzione della temperatura

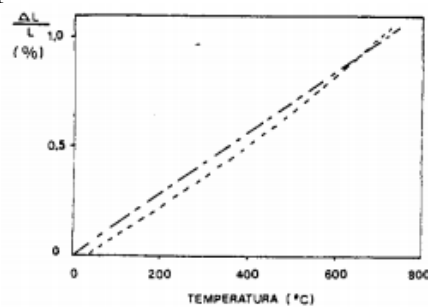


Figura 0-19 - Effetto della temperature sulla dilatazione termica dell'acciaio

4.5. Effetto delle alte temperature sul calcestruzzo armato

Nei paragrafi precedenti sono stati valutati separatamente gli effetti prodotti dalle alte temperature su calcestruzzo ed acciaio.

Da tali considerazioni è emerso che in entrambi i casi l'esposizione alle alte temperature di incendio provoca il decadimento delle proprietà meccaniche che caratterizzano i materiali alle temperature ambiente.

I principali risultati dello studio effettuato conducono ad affermare che per il calcestruzzo, in seguito a trattamento termico, diminuisce il valore della resistenza a compressione e del modulo elastico mentre per l'acciaio diminuisce il valore della tensione di snervamento e del modulo elastico.

Si vuole cercare di capire come si comporta il calcestruzzo quando esso incorpora e avvolge un'armatura metallica, il conglomerato ottenuto è definito cemento armato o, più propriamente, calcestruzzo armato. Tale conglomerato, ritenuto per anni inalterabile e di durata illimitata al punto da essere definito una pietra artificiale, è in realtà soggetto a fenomeni di degrado che ne alterano le proprietà. Per garantire quindi la durabilità delle strutture in cemento armato è fondamentale la conoscenza dei più importanti meccanismi di degrado e della determinazione dei fattori che influenzano la velocità degli stessi.

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

Quando si parla di degrado del calcestruzzo difficilmente si riesce ad attribuirlo ad una sola causa poiché spesso più processi possono avvenire contemporaneamente, interagendo, a volte, in modo sinergico. Essi portano ad una diminuzione del carattere protettivo del calcestruzzo dal punto di vista fisico (aumento della permeabilità, formazione di fessure, distacchi di materiale) favorendo così la penetrazione di sostanze aggressive nel bulk del materiale e promuovendo la corrosione dell'eventuale ferro di armatura.

In tal senso la soluzione più ovvia al problema di come preservare e proteggere le strutture in cemento armato nel tempo è quella di bloccare la strada che conduce gli agenti aggressivi presenti nell'atmosfera verso l'interno della struttura; l'applicazione di un rivestimento sulla superficie esterna del cemento è uno dei mezzi possibili e sicuramente l'unico applicabile in caso di strutture già esistenti e per cui non sia stato adottato, in fase di costruzione, alcun provvedimento per la protezione delle armature.

Le altre tecnologie disponibili al giorno d'oggi per la prevenzione dei fenomeni di degrado del cemento armato devono, infatti, essere previste in fase di progetto.

4.5.1. L'impiego del calcestruzzo armato

Il vasto impiego del calcestruzzo armato nel campo delle costruzioni si basa sostanzialmente su due concetti:

- La solidarizzazione del calcestruzzo, che resiste agli sforzi di compressione, e dell'acciaio, che resiste alle sollecitazioni di trazione;
- Sul fatto che i coefficienti di dilatazione termica dei due materiali sono pressoché identici nel campo delle escursioni termiche che si verificano a temperatura ambiente

Tuttavia, sotto l'azione delle alte temperature vengono a modificarsi sia le caratteristiche dell'acciaio sia quelle del calcestruzzo ed in particolare viene fortemente compromessa la solidarizzazione tra i due materiali.

4.5.2. Il copriferro

Si ricorda che il copriferro svolge la funzione di elemento protettivo per l'acciaio di armatura inglobato nel calcestruzzo.

L'acciaio, normalmente viene associato al calcestruzzo per espletare una delle seguenti funzioni:

- Resistere alle tensioni di trazione indotte dai carichi o causate da forti differenze di temperatura;

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

- Limitare l'apertura delle fessure provocate dalle tensioni di trazione dovute al ritiro del calcestruzzo.

Si ricorda che, tranne che per le tensioni di trazione derivanti da sollecitazioni taglianti, l'azione dell'armatura è tanto più efficace quanto più la si dispone vicino ai lembi della sezione: così operando, infatti si aumenta il braccio della coppia interna resistenze e l'inerzia della sezione. Si ricorda inoltre che la distanza fra l'armatura è il lembo della sezione non può essere piccolo a piacere, poiché il calcestruzzo di copriferro deve:

- Proteggere l'armatura contro l'esposizione ad agenti aggressivi;
- Assicurare l'aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- Proteggere l'acciaio del fuoco.

Lo spessore del copriferro, pertanto, deve essere considerato uno dei parametri strutturali più importanti in relazione al fenomeno della degrado delle armature. In dipendenza dalle condizioni ambientali un valore minimo di copriferro tra 25 e 40 mm deve essere considerato come il più basso limite per assicurare una durevole passivazione dell'acciaio nel calcestruzzo. Naturalmente la potenziale efficacia di un adeguato spessore di copriferro può essere raggiunta in pratica se si garantiscono al calcestruzzo adeguate caratteristiche di rapporto acqua/cemento, dell'inerte, etc.

In ogni caso il presupposto dal quale si parte quando si realizza il copriferro è che esso sia costituito da materiale omogeneo e compatto. Infatti solo se si verificano queste due condizioni la protezione dell'acciaio è sicuramente garantita e in tal caso dipende dallo spessore del calcestruzzo e dal suo comportamento alle alte temperature. In relazione al campo "tempo di esposizione- temperatura" si possono distinguere due tipi di comportamento:

- campo di condizioni "tempo-temperatura" nel quale il calcestruzzo resta integro o, per sgretolandosi superficialmente, ricopre ancora con sufficiente spessore l'acciaio;
- campo di condizioni "tempo-temperatura" nel quale il calcestruzzo presenta micro fessurazione estesa e continua, ed uno sgretolamento superficiale.

Nel primo caso il calcestruzzo protegge ancora l'acciaio inglobato, e il flusso di calore che giunge all'armatura per innalzarne la temperatura è quello che può propagarsi attraverso il calcestruzzo mentre nel secondo caso l'armatura viene direttamente a contatto con i fumi caldi generati dall'incendio.

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

I calcestruzzi confezionati con inerti calcarei offrono una maggiore resistenza al fuoco in quanto non subiscono apprezzabili diminuzioni di resistenza meccanica se non oltre i 750°C in corrispondenza dell'inizio della decomposizione termica del calcare in calce ed anidride carbonica. In genere con un calcestruzzo a base di inerte calcareo, compatto ed omogeneo e di spessore costante, i ferri di armatura durante un incendio raggiungono ad esempio la temperatura di 500°C in 70 minuti con un copriferro di 2 cm, in 110 min con un copriferro di 3 cm

Spessore del copriferro	Tempo in minuti impiegato dall'acciaio per raggiungere 500°C	
	Inerte calcareo	Inerte siliceo
2	70	50
3	110	80
4	160	120
5	240	180

TABELLA 2 - Tempo di raggiungimento di 500°C da parte dell'acciaio di armatura in relazione allo spessore del copriferro

Si osserva che la temperatura dei 500°C rappresenta per l'acciaio da armatura un valore critico perché in corrispondenza dei 500°C si abbassa il valore della tensione di snervamento "a caldo" sino a farlo coincidere con il valore della tensione massima ammissibile in esercizio.

Tuttavia, realizzare un copriferro con tali caratteristiche nella pratica è molto difficile e spesso l'acciaio è protetto da un copriferro di spessore variabile e, quel che è peggio, talvolta costituito in alcune zone da calcestruzzo mal compattato e scarsamente omogeneo. Questi punti, deboli, nel caso di incendio divengono vie preferenziali per il flusso termico, capace di provocare un innalzamento localizzato di temperatura che può arrivare e superare i 500°C in un tempo brevissimo anche in presenza di un copriferro relativamente spesso.

Inoltre, a causa dell'elevata conducibilità termica dell'acciaio rispetto al calcestruzzo, il flusso termico è rapidamente trasferito lungo l'armatura che, riscaldandosi, tende a dilatarsi.

La dilatazione dell'acciaio è contrastata dal calcestruzzo più freddo a causa della sua minore conducibilità termica.

Quando l'aderenza tra l'acciaio ed il calcestruzzo non è più sufficiente a contenere la tensione generata dalla diversa dilatazione termica dei due

CAPITOLO 4 - Il comportamento al fuoco del calcestruzzo

materiali, si verifica la caduta di solidarizzazione tra acciaio e calcestruzzo con il conseguente sfilamento dei ferri e distacco altre parti di copriferro. Qualora invece il copriferro si mantenga integro, senza fessure né distacchi

In ultimo la presenza di acqua nella pasta di cemento, per effetto del riscaldamento, tende a salire in superficie per poi evaporare assorbendo calore.

Se l'acqua non riesce a raggiungere la superficie, l'evaporazione si manifesta in modo veloce e brusco provocando scoppi e conseguenti distacchi di materiale causati da valori di pressione del vapore interstiziale superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo.

Tale fenomeno, che prende il nome di spalling, può essere evitato introducendo nell'impasto del calcestruzzo piccole quantità di fibre polimeriche a medio-basso punto di fusione, che fondendo e decomponendosi, producono una porosità artificiale sufficiente a far defluire il vapore in pressione verso la superficie esterna.

Qualora le caratteristiche del calcestruzzo con il quale è realizzato il copriferro non soddisfino i requisiti richiesti per garantire una adeguata protezione dei ferri di armatura nei confronti dell'azione fuoco, si può applicare uno strato di intonaco a base di gesso sopra al copriferro.

La buona resistenza al fuoco del gesso è attribuibile al fatto che la temperatura della superficie esterna si mantiene sotto i 200°C fino a che tutta l'acqua di cristallizzazione del gesso non è stata eliminata per trasformazione del gesso bi-idrato in emidrato e quindi in anidride.

Altro aspetto che rende l'utilizzo del gesso un buon materiale nei confronti dell'incendio è il suo basso coefficiente di dilatazione termica il quale agisce riducendo la possibilità di apertura delle fessure attraverso le quali i fumi caldi potrebbero venire in contatto con l'acciaio con il conseguente danneggiamento.

CAPITOLO 5 . Lo spacco esplosivo (explosive spalling)

Una delle conseguenze dell'esposizione del cemento alle alte temperature è "lo spacco esplosivo" (*explosive spalling*). Esso si manifesta con il distacco, più o meno violento, di strati o frammenti di materiale.

Esso può avvenire attraverso diversi meccanismi, identificando 4 categorie:

Lo **spalling esplosivo** e lo **spalling superficiale**, che può essere interpretato come una particolarità del primo, sono due forme violente del fenomeno. In tali casi il distacco del materiale avviene in modo repentino, con un notevole rilascio di energia.

Nello **spalling d'angolo**, invece, il materiale si distacca in modo graduale dalla superficie esposta dell'elemento strutturale, e lungo piani paralleli alla superficie.

E' evidente che, in qualsiasi forma si manifesti, il danneggiamento indotto dallo spalling su una struttura in calcestruzzo riduce il livello di sicurezza al fuoco della struttura stessa.

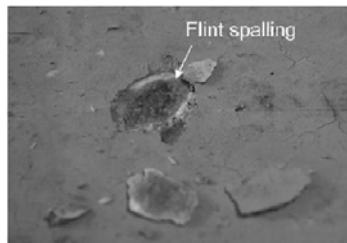


Figura 1 - Spalling dell'aggregato



Figura 2 - Spalling superficiale



Figura 3 - Spalling esplosivo

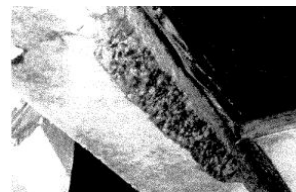


Figura 4 - Spalling d'angolo

5.1. Processi fisici

Lo spalling è un fenomeno difficilmente prevedibile. Generalmente la sua formazione si ritiene dovuta all'azione combinata di due processi fisici (Khoury 2000; Kalifa, Menneteau e Quenard 2000; Dal Pont et al. 2005; Mindeguia et al. 2010):

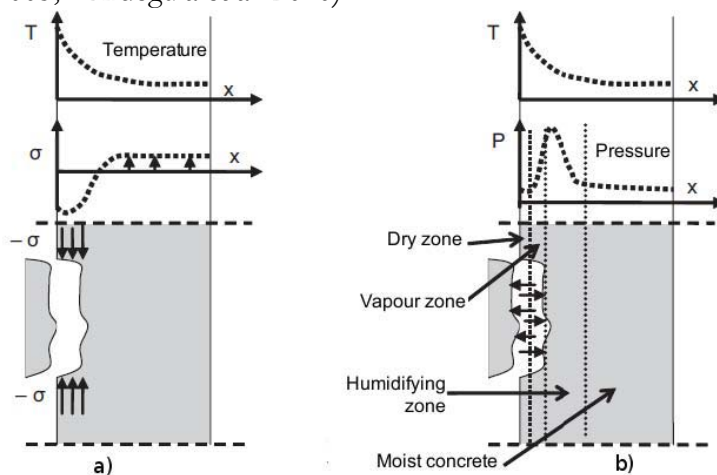


Figura 5 - Processi fisici responsabili dello spalling: a sinistra il processo termo-meccanico; a destra il processo termo-igrometrico.

Il Processo termo-meccanico

Il riscaldamento induce dei gradienti termici in prossimità della superficie riscaldata, i quali, a loro volta, generano degli sforzi (di compressione nelle zone più prossime alla superficie stessa) che, per elevate velocità di riscaldamento (e, di conseguenza, gradienti termici elevati) possono portare localmente al superamento della resistenza a compressione del materiale e, quindi, all'espulsione di frammenti dello stesso;

Il Processo termo-igrometrico

Il riscaldamento del calcestruzzo implica trasporto di massa nel mezzo poroso. I fluidi presenti nel materiale (acqua libera, vapor d'acqua, aria secca) muovono, per via dei gradienti di pressione e di concentrazione molare, nelle zone più interne dell'elemento (leggi di Darcy e di Fick). Essendo tali zone più fredde il vapor d'acqua ivi condensa, generando

CAPITOLO 5 . Lo spacco esplosivo (*explosive spalling*)

gradualmente uno strato ad alto contenuto di umidità, con forte riduzione di permeabilità, vicino alla superficie riscaldata. Quest'ultimo agisce, di fatto, come una barriera per il flusso dei fluidi (*moisture clog*). Pertanto la pressione aumenta localmente e può portare al superamento della resistenza del materiale e, quindi, allo spacco.

Dalle indagini sperimentali svolte in laboratorio su alcuni provini scarichi, si è potuto notare che il solo processo termo-igrometrico è sufficiente per l'innescò dello spalling; per provini di dimensioni maggiori, caricati, tale processo deve essere considerato unitamente all'effetto indotto dalle autotensioni termiche (processo termo-meccanico) e dalle tensioni dovute alla presenza di eventuali carichi.

Allorché la somma delle tensioni ecceda la resistenza a trazione del materiale si assiste allo sviluppo di fessure parallele alla superficie esposta all'azione termica.

Tutto ciò è accompagnato da un improvviso rilascio di energia e da una più o meno violenta espulsione del materiale a ridosso della superficie riscaldata (Khoury 2000). Per quanto riguarda l'effetto dei carichi applicati Sertmehmetoglu (1977) suggerisce che l'unico loro contributo significativo riguarda la generazione di piani di debolezza paralleli alla superficie riscaldata, all'interno dei quali pressioni anche piccole possono concorrere all'innescò dello spalling.

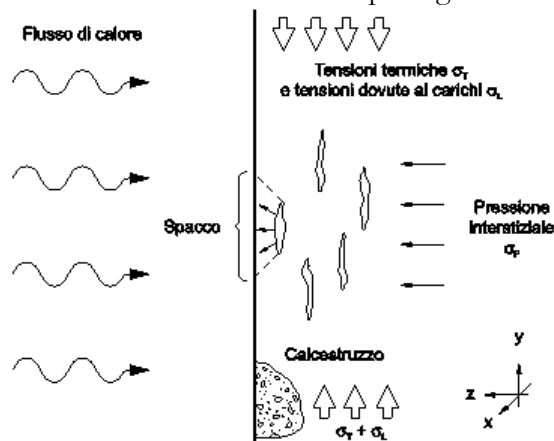


Figura 6 - Forze agenti nel calcestruzzo riscaldato (Khoury 2000).

5.2. Cause e fattori che influenzano lo spalling

La tendenza allo spalling superficiale è aumentata da diversi fattori quali:

- Alto contenuto di umidità;
- Alta densità del calcestruzzo, come per esempio per i calcestruzzi HSC;
- Sforzi di compressione da carichi esterni e precompressione;
- Un rapido incremento della temperatura;
- Considerevoli asimmetrie della distribuzione delle temperature.

Si possono identificare i meccanismi principali che, separatamente o in combinazione, possono causare uno spalling superficiale:

- Alti valori di pressione di vapore;
- Stress termici;
- La trasformazione strutturale degli aggregati che costituiscono il calcestruzzo.

In molti dei casi analizzati durante il corso degli anni, il più importante meccanismo che causa lo spalling è costituito dalla pressione di vapore, come già precedentemente accennato. Questa affermazione è sempre valida quando lo spalling coinvolge una vasta parte della superficie e quando avviene in modo esplosivo.

5.3. Fenomeni di trasporto di vapore all'interno del materiale

Avvicinandosi maggiormente alla problematica si può dire che l'acqua libera all'interno del materiale si trasforma in vapore man mano che la temperatura aumenta. Se il materiale ha una bassa diffusività, il trasporto del vapore viene intralciato e si arriva ad ottenere una sovrappressione all'interno del materiale. Il valore di questa sovrappressione dipende dal bilancio fra il trasporto e produzione di vapore. Lo spalling infatti avviene quando la pressione di vapore, possibilmente in combinazione con gli stress termici e statici, causa nel materiale delle rotture per trazione. Si fa riferimento ad un caso monodimensionale di riscaldamento di un calcestruzzo esposto uniformemente al fuoco su di un solo lato. Quando il calcestruzzo viene riscaldato inizia un processo simultaneo di riscaldamento e di trasporto di umidità.

L'umidità viene trasportata sia quando è in fase liquida che in fase gassosa. Innanzitutto si nota che l'acqua, in prossimità della superficie calda, viene vaporizzata quando si raggiungono i 100°C. Con l'aumento della temperatura, la zona di vapore si muove verso l'interno del

CAPITOLO 5 . Lo spacco esplosivo (explosive spalling)

materiale. Nelle vicinanze della superficie calda si crea quindi una zona secca, il cui spessore aumenta più velocemente per i calcestruzzi normali rispetto a quello ad alta resistenza. Continuando il percorso dall'esterno verso l'interno si incontra una zona, che è più sottile per i calcestruzzi ad alta resistenza, dove avviene la vaporizzazione dell'acqua libera, ed infine, più all'interno, troviamo una zona dove l'umidità è ancora sotto forma di acqua libera. Il vapore, che viene creato nella seconda zona viene trasportato in entrambe le direzioni, sia verso la superficie calda e sia verso la parte dove esiste ancora acqua libera. In questa zona il vapore condensa e torna sotto forma di acqua calda.

Questo significa un incremento del contenuto di umidità appena all'interno della zona di vapore. Il trasporto del vapore è dovuto alle sovrappressioni che sono massime al fronte di vaporizzazione.

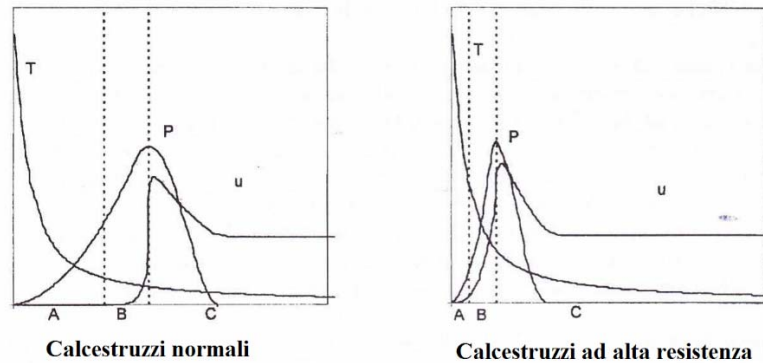


Figura 7 - Illustrazione schematica della temperatura e delle condizioni di umidità. Si indica con: A) zona secca, B) Zona di vapore, C) Zona umida, T) temperatura, P) Pressione di vapore, u) contenuto di umidità

Come il fronte di vapore si muove verso l'interno, la distanza dalla superficie calda aumenta, e risulta essere necessaria una pressione maggiore per portare il vapore verso l'esterno. Allo stesso tempo il contenuto di umidità aumenta nel dominio interno alla zona di vapore e ciò porta ad una diminuzione di trasporto di vapore verso il lato freddo. Si capisce che quindi la pressione di vapore, nei pressi del fronte di vapore, tende ad aumentare. Durante questo processo l'intensità del riscaldamento diminuisce all'aumentare della distanza dalla superficie calda, il che dà una minore produzione di vapore. Si può comunque assumere che la resistenza idrodinamica della zona secca esterna non

CAPITOLO 5 . Lo spacco esplosivo (explosive spalling)

aumenta proporzionalmente al suo spessore e quindi la temperatura, in questa zona, aumenta rapidamente ed aumenta anche la diffusività del gas del calcestruzzo. Quando la distanza dalla zona fredda diminuisce viene facilitato lo scorrimento dell'acqua in quella direzione.

Quando la zona di vapore si muove a certe distanze dalla superficie calda si genera una pressione di vapore massima e quando si giunge a distanze maggiori la pressione diminuisce nuovamente. Questa distanza critica è molto minore per il calcestruzzo ad alta resistenza, circa 5-10 mm, che per i normali calcestruzzi, circa 20-40 mm. Il fatto che la pressione di vapore sviluppata sia sufficiente per causare lo spalling non dipende solo dal valore di umidità ma anche dalla temperatura di riscaldamento, dalla permeabilità, dalla porosità e dalla distribuzione dei pori.

Una considerazione va fatta invece sugli sforzi che si generano all'interno del calcestruzzo durante l'esposizione a fonti di calore. Il calcestruzzo riscaldato è caratterizzato da un forte gradiente termico quando esposto al fuoco a causa della bassa conduttività. Questo produce sforzi termici che generalmente sono bi o tridimensionali. Di conseguenza sorgono sforzi di trazione che possono raggiungere la resistenza a trazione del materiale. Questi sforzi di trazione possono provocare, da soli o in combinazione con la pressione che si genera all'interno dei pori, delle rotture per spalling.

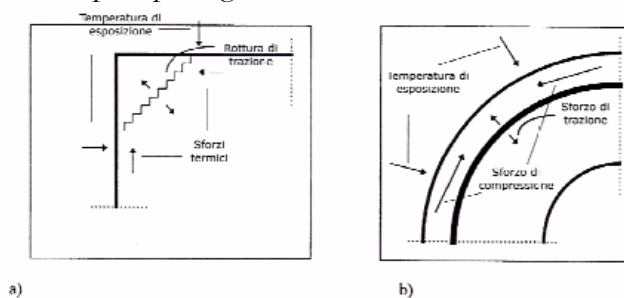


Figura 8 – esempi di rotture per spalling: a) struttura ad angolo, b) struttura con superficie convessa

PARTE II – FASE SPERIMENTALE

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Al fine di analizzare le caratteristiche chimico-fisiche e quindi meccaniche dei calcestruzzi, dopo l'esposizione a temperature elevate, sono state effettuate numerose prove di laboratorio sottoponendo provini di calcestruzzo, all'uopo confezionati, ad opportuni cicli di temperature.

Nell'ambito della sperimentazione sono state considerate due tipologie di calcestruzzi: il Cemento Portland alla Pozzolana CEM II/B-P 42.5 e il cemento Cemento Portland al calcare CEM II/A-LL 42.5.

Il ciclo di temperature a cui sono stati sottoposti i provini ha cercato di riprodurre gli scenari tipici che possono crearsi nelle più diffuse tipologie edilizie. E' per questo che in precedenza sono state analizzate le caratteristiche degli incendi e le modalità di propagazione nei diversi contesti.

6.1. I parametri scelti nella sperimentazione

Lo scenario ipotizzato è stato quello della propagazione di un incendio all'interno di un edificio per civili abitazioni, tenendo quindi in considerazione i seguenti parametri:

Temperature di riferimento: Le temperature medie raggiunte, tenendo conto delle aperture prodotte da rottura dei vetri e da crolli che permettono lo sfogo dei fumi e l'afflusso di aria fresca, normalmente non superano i 600-700°C;

Natura dell'incendio: La curva standard riprodotta con maggior frequenza rappresenta l'incendio ideale di natura cellulosa, provocato ad esempio dalla combustione di materiali quali legno, carta e tessuto. Su di essa è basata la maggior parte delle prove e dei metodi di calcolo

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

deputati alla determinazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali negli edifici;

- **Velocità di riscaldamento:** La norma ISO-834 prevede una crescita della temperatura da 20 a 842 °C nell'arco di 30', con una velocità media di riscaldamento dell'ordine di 27,4 °C min⁻¹.

- **Tipo di legante:** La classe di cemento impiegata con maggiore frequenza è la classe dei Portland di miscela in cui il costituente principale è rappresentato dal clinker di cemento Portland in combinazione con una o più aggiunte minerali;

- **Classi di resistenza:** Impiego di calcestruzzi ordinari con valori della resistenza caratteristica R_{ck} compresi tra 25 Mpa e 50 Mpa, definiti in fase di progetto in funzione della resistenza ma anche della durabilità.

In riferimento a quanto detto la sperimentazione si è basata sui seguenti parametri:

Definizione dello scenario: parametri utilizzati nella sperimentazione

Incremento di temperatura	Da 20°C a 600°C
Natura dell'incendio	Natura cellulosa
Velocità di riscaldamento	20,0 °C min ⁻¹
Tempo di esposizione	60 min

Caratteristiche dei provini

Tipo di legante	Portland di miscela 42.5
Classe di resistenza (NTC08)	C25/30

6.2. Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseformi

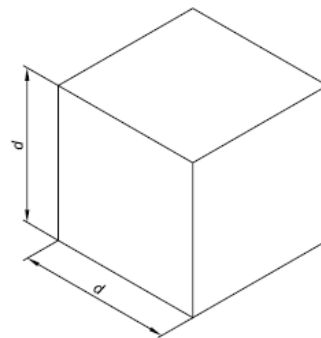
I provini di calcestruzzi sono stati confezionati in base a quanto prescritto dalla norma **UNI EN 12390-1**.

Avendo utilizzato inerti di diametro massimo pari a 30mm i provini cubici sono stati realizzati di lato¹ pari a 150 mm.



Figura 0-1- cubo di calcestruzzo confezionato per la prova

figura 1 Cubo - dimensioni nominali



a, mm	100	150	200	250	300
-------	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 0-2- Dimensioni nominali per provini cubici

¹ La norma ISO 1101 prevede che la dimensione del provino debba essere almeno tre volte e mezzo la dimensione nominale dell'aggregato.

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Le dimensioni designate non devono essere diverse da quelle nominali. La tolleranza sulla dimensione designata “d” tra le superfici casserate deve essere minore di $\pm 0,5\%$.

La dimensione che indicheremo con “a” è data dalla media di valori letti dopo aver tracciato cinque linee equidistanti parallele al lato in questione.

La dimensione che indicheremo con “b” è data dalla media di valori letti dopo aver tracciato cinque linee equidistanti parallele al lato in questione.

La dimensione che indicheremo con “c” è data dalla media di valori letti dopo aver tracciato quattro linee una per ogni faccia laterale.

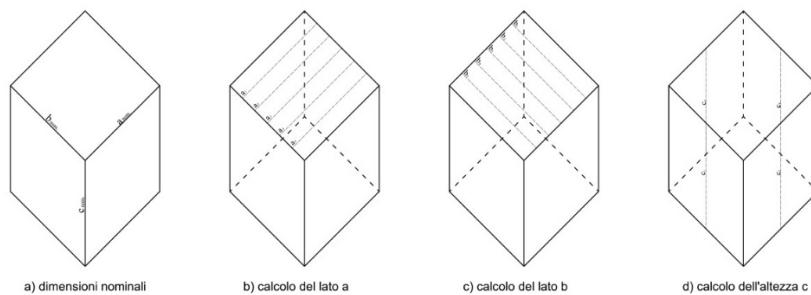


Figura 0-3 - Accettabilità del provino

Per la realizzazione dei provini sono state utilizzate cosseformi calibrate idonee in acciaio:



Figura 0-4- cassaforma usata per la prova

6.3. Temperature di riferimento e determinazione del numero di provini da confezionare

Le prove in laboratorio sono state condotte ipotizzando sei classi di temperatura:

T ₁	20°C
T ₂	200°C
T ₃	300°C
T ₄	400°C
T ₅	500°C
T ₆	600°C

A tali temperature sono stati sottoposti provini di calcestruzzo realizzati con tre diversi mix-disegn, per ognuna delle due tipologie di calcestruzzo, per un totale di:

- n.18 cubi con Cemento Portland al Calcare (CEM II/A-LL 42.5), che di seguito indicheremo come “calcestruzzo al calcare”
- n.18 cubi con Cemento Portland alla Pozzolana (CEM II/B-P 42.5), che di seguito indicheremo come “calcestruzzo alla pozzolana”

Mix-disegn utilizzato per confezionare i provini:

Mix-disegn calcestruzzo al calcare:

- Aggregato fine 0/4 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita il Salza Irpinia (AV)
- Aggregato naturale 10/20 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita il Salza Irpinia (AV)

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

- Aggregato naturale
16/31,5 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita il Salza Irpinia (AV)
- Additivo
superfluidificante
- Cemento Portland al
calcare (CEM II/A-LL 42.5)
- Acqua

Mix-disegn calcestruzzo al calcare:

Mix-disegn calcestruzzo alla pozzolana:

- Aggregato fine 0/4
costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita il Salza Irpinia (AV)
- Aggregato naturale
10/20 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita il Salza Irpinia (AV)
- Aggregato naturale
16/31,5 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita il Salza Irpinia (AV)
- Additivo
superfluidificante
- Cemento Portland alla
pozzolana (CEM II/B-P 42.5)
- Acqua

6.4. Caratteristiche dei materiali utilizzati

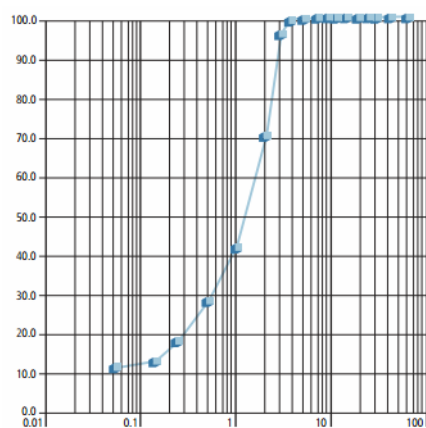
Secondo quanto riportato nelle NTC08 al capitolo 11.2.9.2. sono idonei alla produzione di calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, ovvero provenienti da processi di riciclo conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 12620.

Si allegano i dati degli aggregati ricavati dalla marcatura CE

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Descrizione del prodotto: Aggregato destinato alla produzione di calcestruzzo e conglomerato bituminoso	
Descrizione petrografica: Aggregato fine 0/4 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita in Salza Irpinia (AV)	
Nome commerciale del prodotto: Sabbia	
	UNI EN 12620
Granulometria	0/4
Massa volumica dei granuli	2,69 \pm 0,02 Mg/m ³
Passante allo 0,063	f 1,6
Equivalente in sabbia	SE85
cloruri	<0,01%
Solfati solubili	AS 0,2%
Contenuto carbonato	98%
Assorbimento acqua	1,2 \pm 0,03%
Rilascio di idrocarburi poliaromatici	<0,1 mg/kg

TABELLA 1 - Dati ricavati da marcatura CE



CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Figura 0-5 - Curva tipica media della sabbia

Descrizione del prodotto: Aggregato destinato alla produzione di calcestruzzo e conglomerato bituminoso	
Descrizione petrografica: Aggregato naturale 10/20 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita in Salza Irpinia (AV)	
Nome commerciale del prodotto: Frantumato d_{max} 20	
	UNI EN 12620
Granulometria	10/20
Massa volumica dei granuli	2,69 ± 0,02 Mg/m ³
Passante allo 0,063	F 1,5
Resistenza alla frammentazione	LA30
Resistenza all'abrasione	AAV 10
Resistenza all'usura	MDE 25%
cloruri	<0,01%
Solfati solubili	AS 0,2%
Contenuto carbonato	98%
Assorbimento acqua	0,4 ± 0,02%
Durabilità al gelo disgelo	F4

TABELLA 2 - Dati ricavati dalla marcatura CE

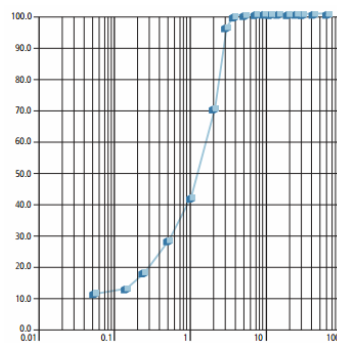


Figura 0-6 - Curva tipica media della sabbia

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Descrizione del prodotto: Aggregato destinato alla produzione di calcestruzzo e conglomerato bituminoso	
Descrizione petrografica: Aggregato naturale 16/31,5 costituito da frammenti di roccia calcarea della cava sita in Salza Irpinia (AV)	
Nome commerciale del prodotto: Frantumato d_{max} 30	
	UNI EN 12620
Granulometria	16/31,5
Massa volumica dei granuli	2,69 ± 0,02 Mg/m ³
Passante allo 0,063	F 1,5
Resistenza alla frammentazione	LA30
cloruri	<0,01%
Solfati solubili	AS 0,2%
Contenuto carbonato	98%
Assorbimento acqua	0,3 ± 0,02%
Durabilità al gelo disgelo	F4
Rilascio di idrocarburi poliaromatici	<0,1 mg/kg

TABELLA 3 - Dati ricavati dalla marcatura CE

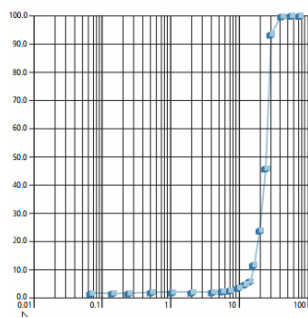


Figura 0-7 - Curva tipica media dell' aggregato d_{max} 30

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

CERTOCEM 42,5 R CEMENTO PORTLAND AL CA EN 197-1 CEM (I/A-I)

Conformemente alla composizione prescritta dalla norma UNI EN 197/1, questo cemento, dotato del marchio CE come previsto dalla Direttiva comunitaria 89/106/CE (riferita cioè al nucleo del cemento ad esclusione del soffio di calcio e degli additivi), contiene Clinker dal 80% a 94%, calcare dal 6% a 20%, ed eventuali costituenti secondari minori.

CARATTERISTICHE

CHEMICHE

Descrizione	Metodo di prova	Valori indicativi (Medie su base annua) (1)	Limiti caratteristici di norma
Solfati (SO ₃)	UNI EN 196/2	≤ 2,60%	≤ 4,00%
Cloruri (Cl ⁻)	UNI EN 196/2	≤ 0,05 %	≤ 0,15 %
Cemento esclusivamente solubile	UNI EN 196/10	≤ 0,0001%	≤ 0,0003 %

FISICHE

Descrizione	Metodo di prova	Valori indicativi (Medie su base annua) (1)	Limiti caratteristici di norma
Superficie specifica (Blaine)	UNI EN 196/6	4300 ± 4400 (cm ² /g)	
Tempo di inizio presa	UNI EN 196/7	130-180 minuti	≥ 60 minuti
Stabilità	UNI EN 196/7	0 mm	≤ 10 mm

MECCANICHE

Descrizione	Valori indicativi (Medie) (1)	Limiti caratteristici di norma
Resistenza a compressione dopo idratazione (a 28 Jgg. UNI EN 196/1)	27,0 MPa	≥ 35,0 MPa
Resistenza a compressione dopo idratazione (a 28 Jgg. UNI EN 196/1)	52,1 MPa	≥ 42,5 MPa ≥ 62,5 MPa

(1) I valori espressi rappresentano medie annue ai quali è lecito attribuire il posizionamento dei valori medi, per i parametri indicati. Calcolatopoli, appartenenti al tipo e alla classe indicati in tavola, calcolati su base annua e considerando i dati dell'autocertificazione.

IMPIEGHI

Calcestruzzo armato, preparato sul posto o prefabbricato, con elevata resistenza iniziale.

Calcestruzzo per fondazioni e per tutti i lavori in ambiente aggressivo

Getti di spessore elevato

Distribuzione dei terreni

DISTRIBUZIONE

Grado nelle varianti: trasportabile, padana e rendere ogni portone

Stiva

QUALITÀ

CEC ha certificato la conformità di quel prodotto che del sistema di produzione e controllo secondo la normativa vigente

CEC ha certificato il Sistema di Qualità Aziendale, secondo la Norma UNI EN ISO 9001:2000

CEC ha certificato il Sistema di Qualità Ambientale, secondo la Norma UNI EN ISO 14001:2004

Figura 0-8 - Scheda tecnica del Cemento al calcare

TENACEM 42,5 R

CEMENTO PORTLAND ALLA POZZOLANA EN 197-1 CEM I/A

Conformemente alla composizione prescritta dalla norma UNI EN 197/1, questo cemento, dotato del marchio CE come previsto dalla Direttiva comunitaria 89/106/CE (riferita cioè al nucleo del cemento ad esclusione del soffiato di calcio e degli additivi), contiene Clinker dal 55% + 79%, pozzolana naturale dal 21% + 35%, ed eventuali costituenti secondari minori.

CARATTERISTICHE

CHEMICHE

Descrizione	Metodo di prova	Valori indicativi (Medio su base annua) (1)	Limiti caratteristici di norma
Solfati (SO ₃)	UNI EN 196/2	< 2,30%	≤ 4,70%
Clinker (C)	UNE EN 196/21	≥ 0,25 %	≤ 0,1%
Ceneri assolute solubili	UNE EN 196/10	≤ 0,0001%	≤ 0,0002%

FISICHE

Descrizione	Metodo di prova	Valori indicativi (Medio su base annua) (1)	Limiti caratteristici di norma
Superficie specifica (Blaine)	UNI EN 196/6	4000 + 400 (cm ² /g)	
Tempo di inizio presa	UNI EN 196/3	> 120 minuti	≥ 90 minuti
Stabilità	UNI EN 196/3	0 mm	≤ 10 mm

MECCANICHE

Descrizione	Valori indicativi (Medio) (1)	Limiti caratteristici di norma
Resistenza a compressione dopo idratazione di 28g + UNI EN 196/1	25,0 MPa	≥ 23,0 MPa
Resistenza a compressione dopo idratazione di 180g + UNI EN 196/1	50,0 MPa	≥ 42,5 MPa

(1) I valori espressi rappresentano range intorno ai quali è lecito attendersi il posizionamento dei valori medi, per i parametri indicati. Caratteristiche apparenti al tipo o alle classi indicati in tabella, calcolati su base annua e considerando i dati dell'autocertificazione.

IMPIEGHI

Cemento pronto all'uso, preparato sul posto o prefabbricato, con elevata resistenza iniziale.
Calcestruzzo per fondazioni e per tutti i lavori in ambiente aggressivo.
Getti di spessore elevato.
Stabilizzazione dei terreni.

DISTRIBUZIONE

Secco nelle varianti: hemimontabile, padana o rendere e/o perenne.
Shunt.

QUALITÀ

L.T.C. ha certificato la conformità sia del prodotto che del sistema di produzione e controllo secondo la normativa vigente.
JONK ha certificato il Sistema di Qualità Aziendale secondo la Norma UNI EN ISO 9001:2000.
JONK ha certificato il Sistema di Qualità Aziendale secondo la Norma UNI EN ISO 14001:2004.

CONFERENZA NAZIONALE ITALIANA MATERIALI
Settore per la Qualità delle Costruzioni

Figura 0-9 - Scheda tecnica del Cemento alla pozzolana

Figura 0-8 - Scheda tecnica del Cemento al calcare

Figura 0-9 - Scheda tecnica del Cemento alla pozzolana

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

L'impasto dei componenti del conglomerato cementizio è stato eseguito presso l'impianto di betonaggio C.M.C.s.r.l. sito in Santa Maria la Carità (NA).

Inerti		%	Kg/m ³	M.V ol.	Volu mi	Ass. %	Umid ità	H2 0	Kg/m ³ eff.
Sabbia B.Cave 0/4		0	0,000	2,7	0,000	1,500	1,500	0,000	0,000
Sabbia 0/4 Irpinia		52,5	1013,517	2,69	376,772	1,200	0,200	-10,015	1003,502
Pietrisco 4/8		18,5	360,144	2,713	132,767	0,412	0,412	0,000	360,144
Pietrisco 8/20		29	564,488	2,712	208,122	0,107	0,107	0,000	564,488
Filler		0	0,000	3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Argilla esp.		0	0,000	2,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CEM: II A-LL 42,5 R		-	300	3,15	95,3	-	-	-	300
						-	-	-	
Superfluidificante		0,796	2,403	1,06	2,267	-	-	-	2,403
Viscosizzante			0,000	1,06	0,000	-	-	-	0,000
Acqua di progetto 1		173,4	171,600	1	171,600	-	-	-	181,615
Acqua di riciclo		-	0,000	1,06	0,000	-	-	-	0,000
fini acqua riciclo		-	0,000		0,000	-	-	-	0,000
Aria inglobata		1,8	18,000	1	18,000	-	-	-	18,000
a/c	0,578					-	-	-	
M. Volumica teorica		-	2397,139	-	1000,00	-	-	-	2397,139

TABELLA 4 - Miscela per 1m³ di getto per il confezionamento del calcestruzzo al calcare

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Inerti		%	Kg/m ³	M.Vo l.	Volu mi	Ass . %	Umid ità	H2O	Kg/m ³ eff.
Sabbia B.Cave 0/4		0	0,000	2,7	0,000	1,50 0	1,500	0,000	0,000
Sabbia 0/4 Irpina		52, 5	1006,5 31	2,69	374,1 75	1,20 0	1,800	5,968	1012,49 9
Pietrisco 4/8		18, 5	357,66 2	2,713	131,8 52	0,41 2	0,412	0,000	357,662
Pietrisco 8/20		29	560,59 8	2,712	206,6 87	0,10 7	0,107	0,000	560,598
Filler		0	0,000	3	0,000	0,00 0	0,000	0,000	0,000
Argilla esp.		0	0,000	2,3	0,000	0,00 0	0,000	0,000	0,000
CEM: II B-P 42,5 R		-	300	3,15	95,3	-	-	-	300,0
						-	-	-	
Superfluidifican te		0,7 95	2,530	1,06	2,387	-	-	-	2,530
Viscosizzante			0,000	1,06	0,000	-	-	-	0,000
Acqua di progetto 1		173, 5	171,60 0	1	171,6 00	-	-	-	165,632
Acqua di riciclo		-	0,000	1,06	0,000	-	-	-	0,000
fini acqua riciclo		-	0,000		0,000	-	-	-	0,000
Aria inglobata		1,8	18,000	1	18,00 0	-	-	-	18,000
a/c	0,57 8					-	-	-	
M. Volumica teorica		-	2399,11 1	-	1000, 00	-	-	-	2399,11 1

TABELLA 5 - Miscela per 1m³ di getto per il confezionamento del calcestruzzo alla pozzolana

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Nella definizione del fuso granulometrico gli aggregati sono gli stessi per entrambe le miscele.

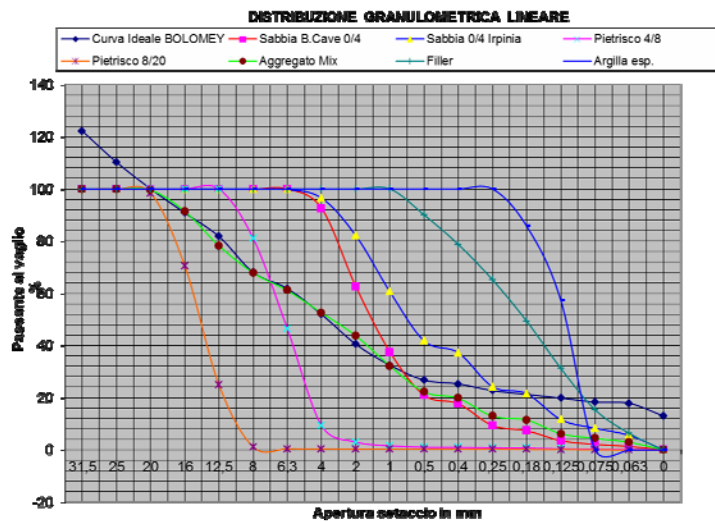


Figura 0-10 - Distribuzione granulometrica lineare

Il confezionamento del calcestruzzo è stato realizzato direttamente in loco

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature



Dopo aver atteso i 28 giorni di maturazione in ambiente controllato, i provini una volta etichettati. Di questi, per ognuno dei due tipi di calcestruzzo, sono stati monitorati, a campione, 3 provini (n.5; n.10; n.15). Di essi è stata valutata la variazione di peso per un certo numero di giorni. I campioni sono stati ritenuti pronti per l'impiego nel momento in cui la variazione di massa è risultata pressoché trascurabile, onde evitare problemi di sovrappressione nella massa di calcestruzzo esposta alle alte temperature, per la presenza di sovrappressioni dovute all'acqua presente nei pori.

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

	Calcestruzzo alla Pozzolana (CEM II/B-P 42.5)			Calcestruzzo al Calcare (CEM II/A-LL 42.5)		
	Provino n.5	Provino n.10	Provino n.15	Provino n.5	Provino n.10	Provino n.15
	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso
Gior no	grammi	grammi	gram mi	grammi	grammi	grammi
1	8170	8130	8230	8280	8260	8290
2	8135	8100	8195	8240	8215	8245
3	8125	8090	8182	8230	8200	8235
4	8120	8082	8179	8220	8191	8229
5	8114	8078	8171	8214	8186	8221
6	8105	8069	8161	8200	8176	8210
7	8104	8066	8160	8199	8172	8208
8	8102	8063	8160	8197	8170	8205
9	8100	8062	8159	8194	8169	8201
10	8095	8056	8152	8185	8160	8195
11	8092	8055	8148	8182	8159	8190
12	8091	8052	8145	8182	8155	8186
13	8090	8050	8141	8181	8153	8181
14	8090	8049	8140	8179	8149	8178
15	8090	8049	8139	8178	8146	8176

TABELLA 6 - Monitoraggio dei provini campione (Variazione di massa)

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Temperatura di riferimento prova	Calcestruzzo alla Pozzolana II/B-P 42.5			Calcestruzzo al Calcare II/A-LL 42.5		
	Provin	Provin	Provin	Provin	Provin	Provin
	o	o	o	o	o	o
	n.	n.	n.	n.	n.	n.
20 °C	1	2	3	1	2	3
200 °C	4	5	6	4	5	6
300 °C	7	8	9	7	8	9
400 °C	10	11	12	10	11	12
500 °C	13	14	15	13	14	15
600 °C	16	17	18	16	17	18

TABELLA 7 - Etichette dei provini in riferimento alle temperature di prova

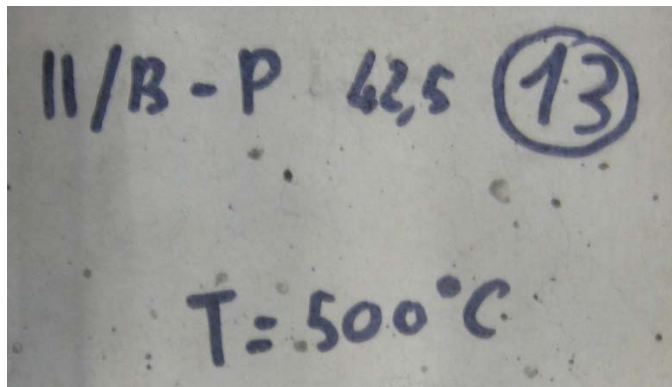


Figura 0-12 - Esempio di etichetta di un provino di calcestruzzo al calcare

Di seguito si riportano le tabelle di calcolo delle dimensioni e delle caratteristiche geometriche e fisiche dopo le sperimentazioni alle diverse temperature

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.1							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	150,0	150
b (lato y)	150	151,0	150,5	150,0	150,5	151,0	151
c (lato z)	150	151,0	151,0	150,0	150,5	-	151
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.2							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	150,5	150,0	150,0	149,5	150
b (lato y)	150	151,0	151,0	150,5	150,5	150,0	151
c (lato z)	150	150,0	150,5	150,0	149,9	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.3							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,0	149,0	149,5	149,0	149,0	149
b (lato y)	150	150,5	150,0	149,5	150,0	149,5	150
c (lato z)	150	150,0	149,5	150,0	150,0	-	150

TABELLA 8 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.4							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	150,0	150
b (lato y)	150	150,5	150,5	150,5	151,0	149,5	150
c (lato z)	150	149,5	150,5	149,5	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.5							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	150,0	150,0	149,5	150,0	150
b (lato y)	150	150,5	150,0	150,0	150,0	150,5	150
c (lato z)	150	150,0	150,5	150,0	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.6							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	149,5	150,0	149,5	149,5	150
b (lato y)	150	150,5	151,0	151,0	151,5	152,0	151
c (lato z)	150	150,0	150,5	149,5	150,0	-	150

TABELLA 9 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=200^{\circ}\text{C}$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.7							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

b (lato y)	150	150,5	150,5	151,0	151,5	151,0	151
c (lato z)	150	150,0	151,5	150,0	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.8							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	149,5	149,5	150,0	149,5	150
b (lato y)	150	150,5	151,0	150,5	150,5	151,5	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	149,5	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.9							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	149,5	150,0	149,5	150,5	150
b (lato y)	150	149,5	150,0	150,0	150,0	149,5	150
c (lato z)	150	150,5	151,0	151,0	150,5	-	151

TABELLA 10 - . Calcolo delle caratteristiche geometriche (T=300°C)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.10							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	151,5	150,0	151,5	150,0	151,5	151
c (lato z)	150	149,5	149,5	150,0	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.11							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	150,0	150,0	150,5	150,0	150
b (lato y)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	150,0	150
c (lato z)	150	151,0	150,0	150,5	151,0	-	151
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.12							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	150,0	150
b (lato y)	150	151,0	151,0	150,5	150,5	150,5	151
c (lato z)	150	150,5	151,0	150,0	149,5	-	150

TABELLA 11 - Calcolo delle caratteristiche geometriche (T=400°C)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.13							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	150,0	150,5	150,0	150,5	150
b (lato y)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	151,0	150
c (lato z)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.14							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	151,5	151,0	151,5	151,5	151,5	151
b (lato y)	150	150,5	150,0	150,0	150,5	150,0	150

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

c (lato z)	150	150,0	150,5	150,0	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.15							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	150,5	151,0	150,5	150,5	151
b (lato y)	150	152,5	151,0	151,5	150,5	150,0	151
c (lato z)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	-	150

TABELLA 12 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=500^{\circ}C$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.16							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	151,5	151,5	151,0	151,5	151,5	151
b (lato y)	150	150,0	150,0	149,5	150,0	150,0	150
c (lato z)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.17							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	150,5	150
b (lato y)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	149,5	150
c (lato z)	150	149,0	149,5	149,0	149,5	-	149
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.18							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	151,0	151,5	151,5	151,0	151,5	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	149,5	149,5	-	150

TABELLA 13 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=600^{\circ}C$)

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

**6.4.1. CALCOLO DELLE CARATTERISTICHE FISICHE DEI
PROVINI DI CALCESTRUZZO ALLA POZZOLANA**

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.1									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22650	22801	136202	3420150	8142	2,381	23,81
b (lato y)	151								
c (lato z)	151								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.2									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8185	2,409	24,09
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.3									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	149	22350	22350	22500	134400	3352500	8068	2,407	24,07
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								

TABELLA 14 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=20°C)

Calcolo del peso specifico					
Numero cubetto	Peso T=20° C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
1	8142	3420150	2,381	23,81	23,99
2	8185	3397500	2,409	24,09	
3	8068	3352500	2,407	24,07	

TABELLA 15 - Calcolo del peso specifico (T=20°C)

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.4									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8026,3	2,378	23,78
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.5									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8089,9	2,397	23,97
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.6									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8030,1	2,364	23,64
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								

TABELLA 16 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=200°C)

Calcolo del peso specifico						
Numero cubetto	Peso T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio	
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³	
4	8026,3	3375000	2,378	23,78	23,797	
5	8089,9	3375000	2,397	23,97		
6	8030,1	3397500	2,364	23,64		

TABELLA 17 - Calcolo del peso specifico (T=200°C)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.7									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8131,4	2,393	23,93
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.8									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8127,1	2,392	23,92
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.9									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base	Area laterale	Area laterale	Area	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

		a x b	a x c	b x c	totale				
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22650	22650	135600	3397500	8156,9	2,401	24,01
b (lato y)	150								
c (lato z)	151								

TABELLA 18 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=300°C)

Calcolo del peso specifico					
Numero cubetto	Peso	T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g		mm ³	kg/cm ³	kN/m ³
7	8131,4		3397500	2,393	23,953
8	8127,1		3397500	2,392	
9	8156,9		3397500	2,401	

TABELLA 19 - Calcolo del peso specifico (T=300°C)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.10									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8049	2,369	23,69
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.11									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22650	22650	135600	3397500	8088	2,381	23,81
b (lato y)	150								
c (lato z)	151								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.12									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8037	2,366	23,66
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								

TABELLA 20 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=400°C)

Calcolo del peso specifico					
Numero cubetto	Peso	T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g		mm ³	kg/cm ³	kN/m ³
10	8049		3397500	2,369	23,72
11	8088		3397500	2,381	
12	8037		3397500	2,366	

TABELLA 21 - Calcolo del peso specifico (T=400°C)

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.13									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8141	2,412	24,12
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.14									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	151	22650	22650	22500	135600	3397500	8145	2,397	23,97
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.15									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	151	22801	22650	22650	136202	3420150	8139	2,38	23,8
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								

Tabella 22 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=500°C)

Calcolo del peso specifico						
Numero cubetto	Peso T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio	
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³	
13	8141	3375000	2,412	24,12	23,963	
14	8145	3397500	2,397	23,97		
15	8139	3420150	2,38	23,8		

Tabella 23 - Calcolo del peso specifico (T=500°C)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.16									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	151	22650	22650	22500	135600	3397500	8035	2,365	23,65
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.17									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22350	22350	134400	3352500	8049	2,401	24,01

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

b (lato y)	150								
c (lato z)	149								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.18									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8068	2,375	23,75
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								

Tabella 24 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=600°C)

Calcolo del peso specifico					
Numero cubetto	Peso T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
16	8035	3397500	2,365	23,65	23,803
17	8049	3352500	2,401	24,01	
18	8068	3397500	2,375	23,75	

Tabella 25 - Calcolo del peso specifico (T=600°C)

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

6.4.2. calcolo delle caratteristiche geometriche dei provini di calcestruzzo al calcare

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.1							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,0	149,5	149,0	149,5	149,5	149
b (lato y)	150	150,5	151,0	150,5	150,5	150,5	151
c (lato z)	150	150,0	149,5	150,0	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.2							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,0	149,0	149,0	149,5	149,5	149
b (lato y)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150
c (lato z)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.3							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	149,5	149,5	149,5	149,5	150
b (lato y)	150	149,5	149,5	149,5	149,5	149,5	150
c (lato z)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	-	150

Tabella 26 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=20^{\circ}C$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.4							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,5	150,5	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	150,0	149,0	149,5	149,0	149,5	149
c (lato z)	150	150,0	151,0	150,0	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.5							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	150,5	150
b (lato y)	150	150,5	151,0	151,0	151,5	151,0	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	151,0	151,5	-	151
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.6							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	150,0	150,0	149,5	149,5	150
b (lato y)	150	151,0	151,0	151,5	151,0	151,5	151
c (lato z)	150	149,5	149,5	150,0	150,0	-	150

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Tabella 27 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=200^{\circ}C$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.7							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	149,5	149,5	149,5	149,0	149
b (lato y)	150	150,0	149,5	149,5	151,0	151,5	150
c (lato z)	150	150,0	150,0	149,5	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.8							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	150,0	150
b (lato y)	150	150,5	150,0	150,5	150,5	150,5	150
c (lato z)	150	149,5	149,5	149,5	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.9							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	150,5	150,5	150,5	150,0	149,5	150
c (lato z)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	-	150

Tabella 28 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=300^{\circ}C$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.10							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	150,0	150,0	149,5	149,5	150
b (lato y)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	150,0	150
c (lato z)	150	150,5	150,5	150,0	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.11							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,5	150,0	150,5	150,0	150
b (lato y)	150	150,0	151,0	151,5	151,0	150,0	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	150,5	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.12							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	149,5	149,5	149,0	149,5	150
b (lato y)	150	151,5	151,5	151,0	151,5	151,0	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	149,5	150,0	-	150

Tabella 29 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=400^{\circ}C$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.13							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

b (lato y)	150	151,5	151,0	151,5	151,5	151,0	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	151,0	151,0	-	151
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.14							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,5	150,0	150,5	150,0	150
b (lato y)	150	150,0	150,5	150,5	151,0	151,0	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	150,5	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.15							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	151,0	151,0	150,5	150,5	151
b (lato y)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	150,5	150
c (lato z)	150	151,0	151,5	151,5	151,5	-	151

Tabella 30 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=500^{\circ}C$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.16							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	149,5	150
c (lato z)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.17							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	151,0	150,0	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	150,5	150,0	151,0	150,0	150,5	150
c (lato z)	150	150,0	150,0	149,5	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.18							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	150,0	150,0	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	151,5	151,0	151,0	151,5	152,0	151
c (lato z)	150	150,5	150,5	151,0	150,0	-	151

Tabella 31 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=600^{\circ}C$)

6.4.3. calcolo delle caratteristiche fisiche dei provini di calcestruzzo al calcare

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.1									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	149	22499	22350	22650	134998	3374850	8031	2,38	23,8
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.2									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	149	22350	22350	22500	134400	3352500	8048	2,401	24,01
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.3									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8047	2,384	23,84
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								

Tabella 32 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=20°C)

Calcolo della Peso specifico media						
Numero cubetto	Peso T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio	
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³	
1	8031	3374850	2,380	23,80	23,88	
2	8048	3352500	2,401	24,01		
3	8047	3375000	2,384	23,84		

Tabella 33 - Calcolo del peso specifico (T=20°C)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.4									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22350	22500	22350	134400	3352500	8101	2,416	24,16
b (lato y)	149								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.5									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22650	22801	136202	3420150	8178	2,391	23,91
b (lato y)	151								
c (lato z)	151								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.6									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base	Area laterale	Area laterale	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

		a x b	a x c	b x c					
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8007	2,357	23,57
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								

Tabella 34 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=200°C)

Calcolo della Peso specifico media					
Numero cubetto	Peso T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
4	8101	3352500	2,416	24,16	23,88
5	8178	3420150	2,391	23,91	
6	8007	3397500	2,357	23,57	

Tabella 35 - Calcolo del peso specifico (T=200°C)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.7									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	149	22350	22350	22500	134400	3352500	8113	2,42	24,2
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.8									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8133	2,41	24,1
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.9									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8213	2,433	24,33
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								

Tabella 36 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=300°C)

Calcolo della Peso specifico media					
Numero cubetto	Peso T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
7	8113	3352500	2,42	24,2	24,21
8	8133	3375000	2,41	24,1	
9	8213	3375000	2,433	24,33	

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Tabella 37 - Calcolo del peso specifico ($T=300^{\circ}\text{C}$)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.10									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8146	2,414	24,14
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.11									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8198	2,413	24,13
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.12									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8159	2,401	24,01
b (lato y)	151								
c (lato z)	150								

Tabella 38 - Calcolo delle caratteristiche fisiche ($T=400^{\circ}\text{C}$)

Calcolo della Peso specifico media					
Numero cubetto	Peso $T=20^{\circ}\text{C}$	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
10	8146	3375000	2,414	24,14	24,09
11	8198	3397500	2,413	24,13	
12	8159	3397500	2,401	24,01	

Tabella 39 - Calcolo del peso specifico ($T=400^{\circ}\text{C}$)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.13									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22650	22801	136202	3420150	8050	2,354	23,54
b (lato y)	151								
c (lato z)	151								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.14									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	150	22650	22500	22650	135600	3397500	8082	2,379	23,79

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

b (lato y)	151								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.15									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (lato x)	151	22650	22801	22650	136202	3420150	8176	2,391	23,91
b (lato y)	150								
c (lato z)	151								

Tabella 40 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=500°C)

Calcolo della Peso specifico media						
Numero cubetto	Peso	T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g		mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
13	8050		3420150	2,354	23,54	23,747
14	8082		3397500	2,379	23,79	
15	8176		3420150	2,391	23,91	

Tabella 41 - Calcolo del peso specifico (T=500°C)

Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.16									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm²	mm²	mm²	mm²	mm³	g	kg/cm³	kN/m³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8180	2,424	24,24
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.17									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm²	mm²	mm²	mm²	mm³	g	kg/cm³	kN/m³
a (lato x)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8181	2,424	24,24
b (lato y)	150								
c (lato z)	150								
Caratteristiche geometriche e fisiche cubo n.18									
Lato	Dimensioni Effettive	Area di base a x b	Area laterale a x c	Area laterale b x c	Area totale	Volume	Peso	Peso specifico	Peso specifico
/	mm	mm²	mm²	mm²	mm²	mm³	g	kg/cm³	kN/m³
a (lato x)	150	22650	22650	22801	136202	3420150	8089	2,365	23,65
b (lato y)	151								
c (lato z)	151								

Tabella 42 - Calcolo delle caratteristiche fisiche (T=600°C)

Calcolo della Peso specifico media						
Numero cubetto	Peso	T=20°C	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g		mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
16	8180		3375000	2,424	24,24	24,043
17	8181		3375000	2,424	24,24	

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

18	8089	3420150	2,365	23,65	
----	------	---------	-------	-------	--

Tabella 43 - Calcolo delle caratteristiche fisiche ($T=600^{\circ}\text{C}$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.10							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	151,5	150,0	151,5	150,0	151,5	151
c (lato z)	150	149,5	149,5	150,0	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.11							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	150,0	150,0	150,5	150,0	150
b (lato y)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	150,0	150
c (lato z)	150	151,0	150,0	150,5	151,0	-	151
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.12							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	150,0	150
b (lato y)	150	151,0	151,0	150,5	150,5	150,5	151
c (lato z)	150	150,5	151,0	150,0	149,5	-	150

TABELLA 44 - Calcolo delle caratteristiche geometriche ($T=400^{\circ}\text{C}$)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.13							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	150,0	150,5	150,0	150,5	150
b (lato y)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	151,0	150
c (lato z)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.14							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	151,5	151,0	151,5	151,5	151,5	151
b (lato y)	150	150,5	150,0	150,0	150,5	150,0	150
c (lato z)	150	150,0	150,5	150,0	150,0	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.15							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,5	150,5	151,0	150,5	150,5	151
b (lato y)	150	152,5	151,0	151,5	150,5	150,0	151
c (lato z)	150	150,5	150,5	150,0	150,5	-	150

TABELLA 45 - Calcolo delle caratteristiche geometriche (T=500°C)

Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.16							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	151,5	151,5	151,0	151,5	151,5	151
b (lato y)	150	150,0	150,0	149,5	150,0	150,0	150
c (lato z)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	-	150
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.17							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,5	150,0	150,5	150
b (lato y)	150	149,5	149,5	150,0	149,5	149,5	150
c (lato z)	150	149,0	149,5	149,0	149,5	-	149
Calcolo delle caratteristiche geometriche cubo n.18							
Lato	Dimensioni Nominali	Dimensione effettiva (5 valori per il lato x e per il lato y, 4 valori per il lato z)					Dimensioni Effettive
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (lato x)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150
b (lato y)	150	151,0	151,5	151,5	151,0	151,5	151
c (lato z)	150	150,0	150,0	149,5	149,5	-	150

TABELLA 46- Calcolo delle caratteristiche geometriche (T=600°C)

6.5 - il programma di prova

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Come già detto nei capitoli precedenti in un edificio l'incendio dà origine ad una serie di trasformazioni nel calcestruzzo, che si susseguono al crescere della temperatura, con un conseguente decadimento irreversibile delle prestazioni meccaniche.

Prima di definire le modalità con cui si simulano le condizioni di incendio è importante delineare gli obiettivi che si intende raggiungere ai fini della ricerca.

Gli Obiettivi principali sono:

- **Comparazione, in termini di decadimento prestazionale, delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi esposti ad incendio;**
- **Analisi delle trasformazioni chimiche, causate dall'incendio, all'interno della matrice cementizia;**
- **Idoneità di metodi non distruttivi per l'identificazione delle caratteristiche meccaniche residue all'estinguersi dell'incendio.**

Nel momento in cui si sviluppa un incendio le strutture saranno investite da:

- Gas di combustione;
- Fiamme;
- Fumo;
- Calore.

Ai fini della sperimentazione analizzeremo il decadimento delle prestazioni del calcestruzzo per effetto delle alte temperature, trascurando il contatto diretto con la fiamma.

6.6 Materiali e metodi

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

In questo capitolo verranno fornite alcune informazioni metodologiche fondamentali ai fini della sperimentazione.

Per il raggiungimento degli obiettivi esposti al capitolo precedente verranno condotte le seguenti operazioni:

1. Trattamento termico;
2. Prove non distruttive;
3. Prove distruttive;
4. Analisi termogravimetrica.

6.6.1. TRATTAMENTO TERMICO

Il trattamento termico, effettuato presso il Laboratorio dell'azienda TecnoLab in Poggioreale (NA), viene effettuato con un forno elettrico di potenza 3,3 kW per ceramica e vetro costruito secondo le norme di sicurezza Europee EN 60335-1.

Il forno, di diametro 44cm, è costituito da una camera interna rivestita di materiale refrattario, di forma esagonale per un volume di 50 lt.

Le temperature massime che possono essere applicate sono di circa 1260 °C.

Le tre resistenze elettriche, poste sulle pareti laterali, sono rivestite in materiale ceramico per proteggere le resistenze elettriche da eventuali urti.

La parte inferiore è utilizzata per il posizionamento dei provini, lasciando uno spazio adeguato tra di essi sia in senso orizzontale che in senso verticale, in modo da garantire un trattamento termico uniforme. La parte superiore amovibile è anch'essa in materiale refrattario e riduce al minimo le dispersioni termiche.

La termocoppia è posizionata sulla parete laterale e collegata ad un Thermocomputer (HC4) con cui è possibile programmare il

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

funzionamento del forno mediante un display che indica la temperatura interna.



Figura 0-13 Display Thermocomputer (HC4)



Figura 0-14 Forno utilizzato per il trattamento termico

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

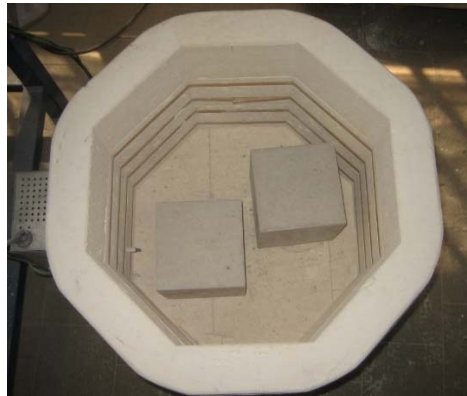


Figura 0-15 Disposizione dei campioni all'interno del forno

6.6.2. PROVE NON DISTRUTTIVE

Comprendono tutte le indagini e le misurazioni realizzate in sito sul manufatto, finalizzate alla ricerca delle principali proprietà del materiale, quali proprietà meccaniche del conglomerato, presenza e posizione delle armature, oltre al monitoraggio di eventuali stati di degrado visibile e non visibile.

I principali vantaggi dell'applicazione di questi metodi di indagine consistono nel:

mantenere integra la struttura analizzata senza dover prelevare campioni di materiale;

possibilità di applicare tali metodi su aree estese della struttura;

6.6.2.1. PROVA ULTRASUONICA

La prova ad ultrasuoni ,effettuata presso il Laboratorio dell'azienda TecnoLab in Poggioreale (NA), segue la norma di riferimento UNI EN 12504-4.

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

La prova consente la determinazione delle caratteristiche elastico-dinamiche dei materiali costituenti i campioni. Nello specifico è possibile monitorare tre parametri fondamentali:

Il ritardo in ricezione dell'impulso, al fine di determinare la velocità di propagazione del mezzo;

La tipologia della forma d'onda, al fine di evidenziare l'eventuale presenza di fratture nel mezzo (presenza di uno o più assi);

Ampiezza e frequenza delle onde longitudinali e trasversali.

L'apparecchiatura per la realizzare la prova agli ultrasuoni è una centralina di acquisizione dati M.A.E A3000-U (Fig.7.8.2.1.I). La centralina è dotata di due sonde, una di trasmissione sonica elettrodinamica (53 KHz) realizzata utilizzando una pastiglia di ceramica piezoelettrica ed una sonda di ricezione di tipo piezoelettrico uguale a quella trasmittitrice.



Figura 0-16 Centralina di acquisizione dei dati

Per quanto riguarda l'esecuzione della prova lo sperimentatore, a seconda delle caratteristiche dell'elemento da indagare, valuta quale tra le seguenti modalità di prova può essere effettuata:

Misura diretta: posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare, metodo che si rivela particolarmente utile anche per la rilevazione di lesioni interne;

Misura semidiretta: posizionando le sonde su due facce adiacenti;
Misura indiretta: posizionando parallelamente trasmettitore e ricevitore, a distanze in scala (10, 20, 30 cm), metodo che è più influenzato dalla pelle superficiale del materiale.

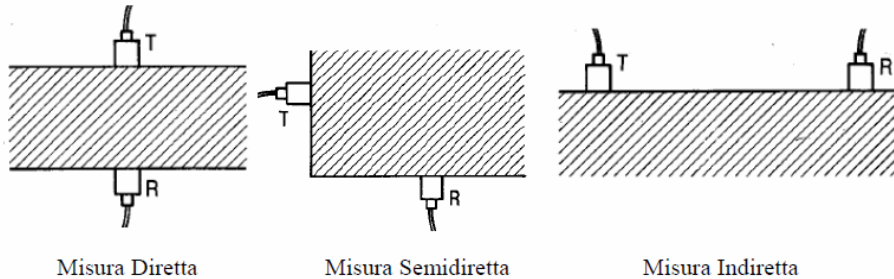


Figura0-17 - Modalità di esecuzione della prova ad ultrasuoni

Nel caso in esame la misura effettuata sui campioni è di tipo diretto. Le operazioni per l'esecuzione della prova sono le seguenti:

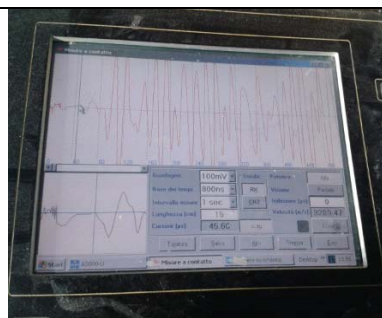
Le sonde si applicano alla superficie, avendo cura che l'adesione di queste ultime alle superfici dell'elemento da sottoporre a prove sia particolarmente accurata, al fine di escludere l'inclusione di aria che provocherebbe un'attenuazione del segnale. I materiali che realizzano tale adesione possono essere diversi: plastilina, grasso di vasellina o altri tipi di grasso.

Viene misurata ed annotata la distanza tra le sonde.

Viene letto il tempo di propagazione dell'onda tramite oscilloscopio



*Figura 0-18 Applicazione delle sonde
tramite gel*



*Figura 0-19 Risultati di prova
ricavati dall'oscilloscopio*

6.6.2.2. PROVA SCLEROMETRICA

La prova sclerometrica, effettuata presso il Laboratorio dell'azienda TecnoLab in Poggioreale (NA), segue la norma di riferimento UNI EN 12504-2.

Scopo della prova è la determinazione dell'indice sclerometrico (o di rimbalzo) in una zona di calcestruzzo indurito, confezionato con aggregati ordinari.



Lo strumento consiste in un'asta, che premuta contro la superficie in esame carica una molla, sulla quale si sgancia una massa battente. Conseguentemente al colpo, tale massa rimbalza trascinando un indice che misura la durezza superficiale del materiale indicando un valore di riferimento nell'apposita scala.

Particolare attenzione deve essere posta nella scelta del punto di battuta.

Con riferimento al metodo di prova normalizzato, ai sensi della UNI EN 12504 – 2, sono stati dapprima individuati i 9 punti da sottoporre a prova distanziati nel modo seguente:

35 mm dal bordo esterno;

40 mm tra due punti d'impatto successivi.

	
<i>Figura 0-20 - Individuazione dei 9 punti d'impatto</i>	<i>Figura 0-21 Esecuzione delle battute sclerometriche</i>

Successivamente ciascun provino è stato posto al di sotto della macchina per le prove di schiacciamento ed è stato caricato con una

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

forza di 30 kN in maniera tale da impedire il movimento dello stesso durante le battute sclerometriche.

6.6.2.3. PROVA ULTRASUONO-SCLEROMETRICA (METODO SONREB)

Le norme di riferimento seguite sono la UNI 12504-2 e la UNI EN 9524.

Scopo della prova è la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo indurito.

Per ridurre gli errori commessi con le due metodologie sopra descritte è stato sviluppato il metodo combinato SONREB (SONic + REBound = ultrasuoni + sclerometro).

La prova combina i risultati di altre due prove che si eseguono separatamente e sono appunto la prova sclerometrica (per la determinazione dell'indice sclerometrico) e la prova ad ultrasuoni (per la misura della velocità di propagazione di un impulso sonico trasmesso attraverso il calcestruzzo).

Il metodo non fornisce in maniera univoca i valori della resistenza se non opportunamente tarato sul materiale di riferimento. Tale processo di taratura può avvenire su cubetti di materiale conservato in fase di esecuzione o su carote estratte da opportuni elementi strutturali.

L'idea di combinare i risultati di queste due prove nasce dal fatto che:

- L'indice sclerometrico è fortemente influenzato dallo strato superficiale;
- La velocità di propagazione dell'ultrasuono è regolata dalla morfologia del materiale al suo interno.

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

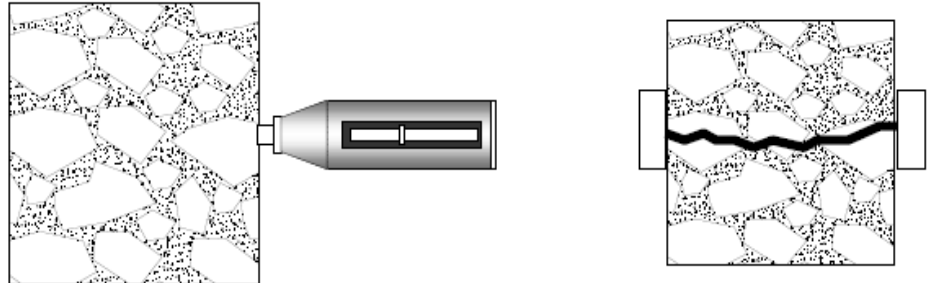


Figura 0-22 - ultrasuoni

In termini teorici sia il rimbalzo di una massa battente (prova sclerometrica) che la propagazione di un impulso all'interno del materiale (prova ultrasonica) sono funzione dell'energia di dissipazione.

La resistenza del materiale è per natura funzione della stessa energia di dissipazione, pertanto correlando le due formulazioni è possibile ricavarne le relazioni che seguono.

$$R_c = a \cdot v \cdot R_s^b \cdot v^\gamma$$

$$\begin{cases} R_{cls1} = \alpha_1 \cdot 7,695 \cdot 10^{(-10)} \cdot R_s^{1,450} \cdot v^{2,58} & (\text{RILEM 1993, NTD4}) \\ R_{cls2} = \alpha_2 \cdot 6,693 \cdot 10^{(-7)} \cdot R_s^{1,246} \cdot v^{1,85} & (\text{J. Gasparik 1992}) \\ R_{cls2} = \alpha_3 \cdot 9,964 \cdot 10^{(-9)} \cdot R_s^{1,058} \cdot v^{1,446} & (\text{Di Leo, Pascale 1994}) \end{cases}$$

Dove:

- R_{cls} = resistenza del materiale;
- R_s = valore medio totale dell'indice di rimbalzo;
- v = velocità di propagazione;
- \square = peso specifico del calcestruzzo;
- α = coefficiente di normalizzazione provino =

$$\frac{R_{cls_{provino}}}{v \cdot R_s^b \cdot v^\gamma}$$

- ν = modulo di Poisson

6.6.3. PROVE DISTRUTTIVE

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Comprendono tutte quelle indagini finalizzate alla ricerca delle proprietà meccaniche del materiale, oltre alle analisi volte all'individuazione di eventuali stati di degrado all'interno del materiale. Per poter eseguire queste prove è indispensabile avere a disposizione alcuni provini di materiale da testare. I campioni possono essere di due tipi:

- Realizzati specificatamente per i test di laboratorio previsti dalla normativa al fine di ottenere la certificazione del materiale ;
Prelevati direttamente dal manufatto, a mezzo di carotaggi, scegliendo accuratamente le aree da analizzare.

Queste prove si presenta inapplicabile in alcuni casi in quanto:

La struttura potrebbe accusare problemi statici a seguito della mancanza di continuità del materiale;

Dai fori praticati potrebbero innescarsi degradi accelerati non previsti;

Non è sempre applicabile sui beni architettonici o strutture vincolate.

6.6.3.1. PROVE DI SCHIACCIAMENTO

La prova di schiacciamento ,effettuata presso il Laboratorio dell'azienda TecnoLab in Poggioreale (NA), segue le norme di riferimento UNI 12390-2,3,4.

La prova consiste nel caricare i provini fino alla rottura in una macchina per prova di compressione conforme alla EN 12390-4. Si registra il carico massimo sopportato dal provino e si calcola la resistenza alla compressione del calcestruzzo.

Il provino deve essere di forma cubica conforme ai requisiti della EN 12350-1, della EN 12390-1, della EN 12390-2 e della EN 12504-1.

Se le dimensioni o la forma dei provini non sono conformi ai requisiti riportati nella

EN 12390-1 perché superano le rispettive tolleranze, essi devono essere scartati, rettificati

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature



Figura 0-23 - Macchina di prova - Acquisitore LONOS TEST

Si riporta il procedimento per il calcolo della resistenza a compressione:

Posizionare i provini cubici in modo che il carico sia applicato perpendicolarmente alla direzione di getto;

Selezionare una velocità di carico costante compresa tra 0,2 MPa/s

(N/mm²·s) e 1,0 MPa/s (N/mm²·s). Applicare il carico al provino

senza colpi e aumentarlo in modo continuo, alla velocità costante selezionata $\pm 10\%$, fino a quando non può più essere sopportato un ulteriore carico;

Registrare il carico massimo indicato;

Valutazione del tipo di rottura (S= soddisfacente; F= esplosivo, NS = non soddisfacente).

La resistenza alla compressione è data dall'equazione:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

dove:

f_c è la resistenza alla compressione, in MegaPascal (Newton per millimetro quadrato);

F è il carico massimo a rottura, in Newton;

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

Ac è l'area della sezione trasversale del provino su cui agisce la forza di compressione, calcolata da misurazioni del provino, in millimetri quadrati.



Figura 0-24 Rottura di un provino



Figura 0-25 - Esempio di rottura soddisfacente (S)

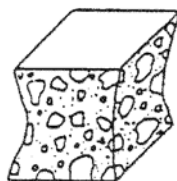
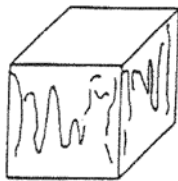


Figura 0-26 - Rotture soddisfacenti di provini cubici (Fig.1 UNI 12390-3)

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

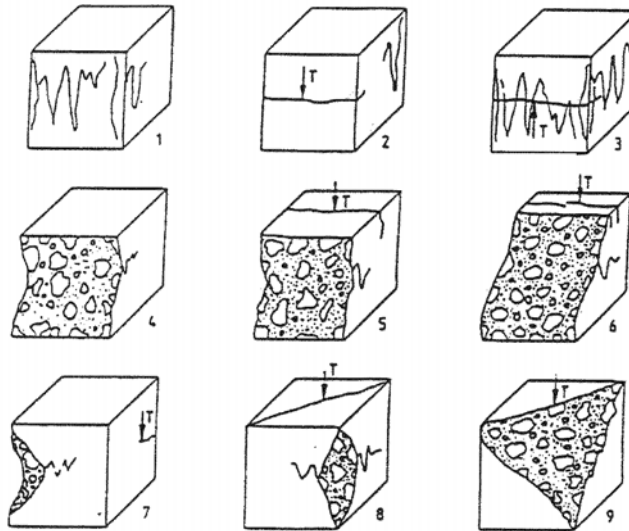


Figura 0-27 - Rotture non soddisfacenti di provini cubici (Fig.2 UNI 12390-3)

6.6.4. ANALISI TERMOGRAVIMETRICA

L'analisi termogravimetrica (TGA) consiste nel rilevare le variazioni di peso che subisce un campione all'aumentare della sua temperatura. Essa permette di valutare la stabilità termica, la velocità di reazione, i processi di reazione e, in taluni casi, la composizione del campione. Si sottopone il campione ad un predefinito ciclo termico e si registra l'andamento del suo peso in funzione della temperatura. Operando in atmosfera inerte, sarà possibile rilevare la diminuzione di peso del campione in corrispondenza delle temperature alle quali avvengono determinate reazioni chimiche che, solitamente, prevedono la formazione di composti gassosi. Due sono gli elementi essenziali per l'analisi termogravimetrica: la temperatura e la perdita di peso. La prima informazione è necessaria per il riconoscimento del prodotto (analisi qualitativa), in quanto ogni composto termicamente decomponibile perde peso ad una temperatura o in un intervallo di temperature

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

prefissati e caratteristici di quel prodotto. Il secondo elemento (perdita di peso) consente invece di stimare - per composti a stechiometria fissa - la percentuale degli stessi presente nel campione (analisi quantitativa).

Per l'interpretazione dei risultati dell'analisi TGA possono risultare molto utili le informazioni ottenute attraverso l'analisi DTA. Gli strumenti più moderni permettono di effettuare contemporaneamente queste due analisi.

Con l'analisi termica differenziale (DTA) viene misurata, durante il riscaldamento, la differenza di temperatura tra il campione analizzato e una sostanza di riferimento che non subisce trasformazioni nell'intervallo di temperatura considerato. In tal modo sarà possibile valutare i fenomeni endotermici (assorbimento di calore) o esotermici (sviluppo di calore) che accompagnano le trasformazioni che caratterizzano il campione in analisi.

Le curve DTA sono utili sia qualitativamente sia quantitativamente; infatti, la posizione e la forma dei picchi possono essere utilizzate per determinare la composizione del campione, mentre l'area sottesa dal picco è proporzionale al calore di reazione e alla quantità di materiale presente. Taluni fenomeni sono prettamente endotermici (fusione, vaporizzazione), altri sempre esotermici (ossidazione), mentre alcuni possono essere esotermici o endotermici (decomposizione).

La procedura di analisi prevede che una quantità di campione (circa 25 mg) venga riscaldato in maniera controllata ($10^{\circ}\text{C}/\text{min}$) fino a 1000°C , registrando la perdita di peso che il materiale subisce nell'intervallo di temperatura considerato.

Da questa analisi si ottengono dei grafici (massa in funzione della temperatura) detti curve termogravimetriche.

La strumentazione è concettualmente semplice, ma praticamente molto delicata e precisa e necessita di controllo e calibrazione periodici: in sostanza è una bilancia di estrema precisione in cui il campione viene riscaldato progressivamente dalla temperatura ambiente fino ad oltre 1000°C con rampe di salita in temperatura programmabili.

I componenti del termogravimetro sono:

CAPITOLO 6 - Resistenze meccaniche di calcestruzzi ordinari esposti ad alte temperature

- Bilancia analitica sensibile (di portata compresa tra 5 e 20mg);
- Fornace (temperatura dai 25 ai 1500 °C);
- Sistema di gas di spurgo che assicura un'atmosfera inerte e la diffusione del calore in ogni punto;
- Elaboratore per il controllo dello strumento, l'acquisizione e la visualizzazione dei dati.



Figura 0-28 - Termogravimetro

PARTE III – analisi delle principali caratteristiche delle opere stradali

CAPITOLO 7 – Le pavimentazioni stradali: funzionalità e composizione

La pavimentazione stradale, costituita da una miscela di aggregati e di leganti, è quella struttura sovrastante un rilevato o il terreno in sito nelle trincee, atta a garantire la transitabilità del traffico veicolare, lungo quelle aree ad uso pubblico, le “strade”, destinate alla circolazione dei pedoni, dei veicoli e degli animali.

Essa deve resistere a grossi carichi concentrati (i veicoli che vi transitano quotidianamente), all'usura, al degrado da parte di agenti fisico-chimici, alle dilatazioni termiche, assolvendo, nel contempo, a diverse funzioni:

- **conferire** caratteristiche superficiali di *planarità* ed *aderenza*, assicurando una circolazione confortevole e sicura;
- **dissipare** in profondità gli sforzi e le pressioni trasmesse dalle ruote veicolari (in relazione alla pressione di gonfiaggio dei pneumatici), affinché l'intero pacchetto stradale possa resistere ad un elevato numero di passaggi, il più a lungo possibile;
- **proteggere** la pavimentazione stessa ed il terreno sottostante da agenti atmosferici pericolosi per la stabilità del piano viabile (dal gelo in particolare).

Il proporzionamento dei vari strati di cui si compone la pavimentazione stradale deve rispettare innanzitutto quanto previsto dalle norme tecniche di riferimento e, in particolare le “*Norme funzionali e geometriche per la costruzione, il controllo e il collaudo delle strade, dei relativi impianti e servizi*”, emanate dal Ministero dei Lavori Pubblici, sentiti il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche, in attuazione dell'art. 13 del D. L.vo 30 aprile 1992, n. 285 “Nuovo Codice della Strada” e successive modificazioni.

Dette norme, sono improntate anche alla sicurezza della circolazione di tutti gli utenti della strada, alla riduzione dell'inquinamento acustico ed atmosferico, ed al rispetto dell'ambiente e di immobili di notevole pregio architettonico o storico.

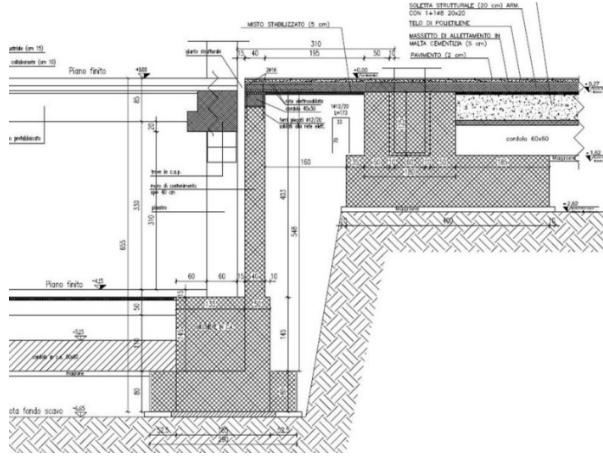


Figura 1 - Sezione stradale

La pavimentazione stradale è costituita da vari strati, ciascuno con caratteristiche proprie, composizionali e funzionali, che spesso possono raggiungere anche la profondità di un metro; i tre elementi principali che la compongono sono: il manto, la struttura ed il sottofondo.

Il manto è la parte più superficiale della pavimentazione, e in quanto tale rappresenta il primo contatto con il carico; deve perciò essere dotato di resistenza notevole e caratteristiche geometriche perfette: **i materiali utilizzati dovranno pertanto avere delle formulazioni compositive specifiche, che non solo assolvano alle funzioni richieste, ma le mantengano elevate nel tempo, affinché la vita utile della pavimentazione stessa sia la più lunga possibile.** Il manto effettuerà una protezione di tutta la struttura della pavimentazione, in particolare nei confronti di due elementi: l'elemento traffico e l'elemento ambiente.

La protezione dal traffico è relativa sia ai carichi trasmessi dalle ruote, come abbiamo già avuto modo di accennare, ma anche all'azione di sfregamento esercitata dai pneumatici stessi, con conseguente abrasione della superficie, perdita di attrito (resistenza allo slittamento) e inevitabile aumento della pericolosità. La protezione dall'ambiente invece, deriva da due principali forme di attacco: gli effetti termici, che conferiscono alla pavimentazione continue contrazioni e dilatazioni, ed il deterioramento provocato dal sole, da cui assorbono quotidianamente raggi ultravioletti,

che ne accelerano l'invecchiamento; per ovviare a questi tipi di attacco, il manto risultante, dovrà pertanto essere elastico e durevole. Il bitume è certamente uno dei leganti più utilizzati per questo tipo di strato, con uno spettro di utilizzo che va da strade a traffico intenso, a strade a traffico ridotto. La struttura permette il trasferimento del carico dal manto al sottofondo. Anch'essa è composta da vari strati, che analizzeremo nel dettaglio fra poco, con materiali e caratteristiche di resistenza differenti. Ogni strato riceve un carico dallo strato sovrastante, e lo diffonde su un'area più ampia della parte sottostante; chiaramente le sollecitazioni maggiori saranno nella parte superiore della pavimentazione, e pertanto ad essa verranno richieste caratteristiche di resistenza più elevate. Inoltre queste stesse caratteristiche saranno rapportate alla tipologia di carico, ossia al livello di traffico presente, legato alla sua ritmicità, ma anche alla classificazione dei veicoli che percorrono la strada stessa, che potranno essere di tipo pesante, leggero o a due ruote.

La struttura è composta a sua volta da materiali granulari e da materiali legati: **i materiali granulari, comprendenti pietrisco e ghiaia, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli;** tuttavia a seguito dei carichi ripetuti e all'avvicinarsi dei granuli stessi gli uni agli altri, si potrebbe verificare un graduale "addensamento" in qualsiasi strato della struttura, e che avrebbe come diretta conseguenza una deformazione superficiale, con un andamento tipico di solchi in corrispondenza dell'area di passaggio (impronta) delle ruote; **i materiali legati** invece, che includono i materiali stabilizzati e l'asfalto, **hanno il compito di ricevere i carichi verticali, che generano sollecitazioni di flessione, ossia trazione nella metà inferiore e compressione nella metà superiore, a causa del continuo passaggio di veicoli, con conseguente rottura a fatica;** si creano infatti delle fessure nella parte inferiore dello strato, che si propagano verticalmente e che risalgono lungo la struttura, man mano che le ripetizioni di carico proseguono.

Il sottofondo è costituito da terreno naturale, alla base del corpo stradale; **le caratteristiche intrinseche dei materiali utilizzati, determinano una maggiore o minore resistenza del sottofondo stesso, influenzando la scelta del tipo di struttura sovrastante da**

adottare, che dovrà garantire una distribuzione del carico tale da non causare deformazioni permanenti.

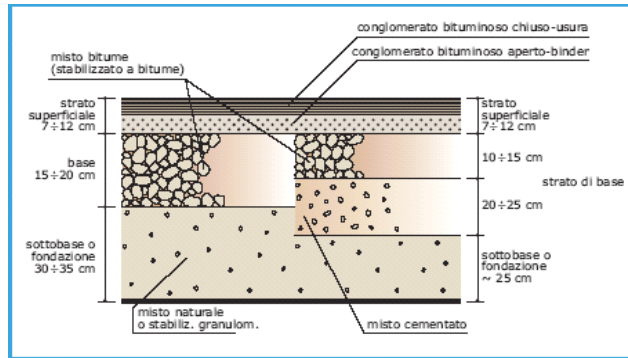


Figura 2 - Sovrastuttura stradale flessibile e semirigida

Analizzando più in dettaglio gli strati che costituiscono una pavimentazione, possiamo distinguere, partendo dall'alto:

- uno strato di usura, in conglomerato bituminoso;
- uno strato di collegamento, in conglomerato bituminoso, denominato "binder";
- uno strato di base, sempre in conglomerato bituminoso;
- uno strato di sottobase in misto cementato, utilizzato solamente per strade e autostrade con un volume notevole di traffico pesante;
- uno strato di fondazione, in misto granulare, stabilizzato meccanicamente (per mezzo di rulli compattatori particolari);
- uno strato di sottofondazione, utilizzato per strade a ridotto o nullo volume di traffico pesante, in sostituzione della fondazione, o nei casi in cui il terreno sia di tipo limoso o argilloso.

Anche gli spessori dei vari strati possono cambiare, in funzione della tipologia di pavimentazione, che potrà essere flessibile, semi-rigida o rigida: in quest'ultimo caso lo strato superficiale è però costituito da conglomerato cementizio e non bituminoso;

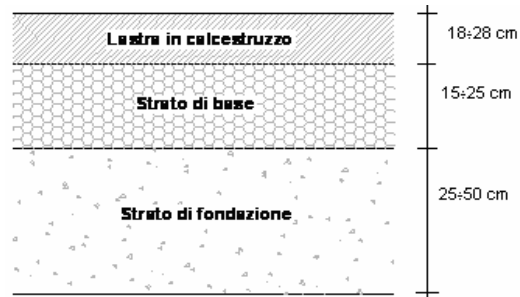


Figura 3 - Sovrastruttura stradale rigida

7.1- Cenni sulla progettazione stradale

Progettare una sovrastruttura stradale (pavimentazione) significa dimensionare i suoi elementi (strati) e definire le caratteristiche dei materiali componenti con l'obiettivo di ottenere una certa durata nel tempo.

In particolare la sua vita utile è intesa come il numero di anni durante il quale la pavimentazione deve assicurare, attraverso normali opere di manutenzione, condizioni di funzionalità superiori allo stato limite (livello minimo di funzionalità al di sotto del quale è necessario intervenire).

La sua affidabilità invece è la probabilità che essa sia in grado di assicurare, con normali operazioni di manutenzione, condizioni di circolazione superiori allo stato limite, per l'intera durata della sua vita utile.

Il progetto di una sovrastruttura si effettua assegnando numero e spessori degli strati, le caratteristiche dei materiali e verificando che tale configurazione, sottoposta alle azioni del traffico e degli agenti atmosferici, soddisfi gli obiettivi specifici (vita utile e affidabilità).

E' quindi un problema di verifica.

Generalmente nella progettazione di una sovrastruttura stradale si utilizzano metodi:

- **Empirici**, ed in tal caso i parametri da considerare sono limitati alla portanza del sottofondo generalmente espressa mediante il C.B.R. Tale metodo utilizza, nella definizione degli elementi della sovrastruttura

in progetto, i risultati derivanti da esperienze su circuiti di prova o in strade in esercizio di cui, attraverso metodi statistici, si individuano le relazioni tra numero di veicoli (assi) transitati, caratteristiche strutturali della pavimentazione (qualità dei materiali, spessore degli strati, ecc.), portanza del sottofondo e decadimento delle qualità funzionali (regolarità, aderenza, ecc.) esistenti.





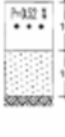





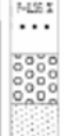

- **Razionali**, ed in questo è indispensabile conoscere i parametri che definiscono il comportamento meccanico dei materiali che compongono i singoli strati. Con l'approccio razionale si costruisce un modello della pavimentazione in grado di riprodurre nel miglior modo possibile il funzionamento meccanico delle struttura che viene utilizzato per determinare lo stato tensionale e deformativo nei diversi strati e nel terreno di sottofondo. Tensioni e deformazioni trovate permettono poi, sulla base delle leggi che descrivono il comportamento dei materiali, di effettuare la verifica la verifica della sovrastruttura.

- a mezzo **Cataloghi di sovrastrutture**, in particolare il “Catalogo delle Pavimentazioni Stradali” redatto dal Consiglio Nazionale Delle ricerche. Tali Cataloghi delle pavimentazioni suggeriscono un ventaglio di soluzioni progettuali in funzione di un numero limitato di parametri iniziali. Il Catalogo italiano delle Pavimentazioni Stradali, prima menzionato, come quelli di altri paesi, è uno strumento d'uso immediato, i dati di ingresso necessari infatti riguardano: la tipologia della strada (si fa riferimento alla classificazione funzionale del CdS), la portanza del sottofondo (presenta valori di buona, media e scarsa portanza) e l'entità del traffico pesante) sono considerati 6 livelli di traffico).

Le schede sono identificate con un codice composto da una cifra e una parte alfabetica:

- il numero, che va da 1 a 8, indica il tipo di strada
- La parte alfabetica indica la tipologia di pavimentazione:
 - F = flessibile
 - SR = semirigida
 - RG = rigida non armata RC = rigida con armatura

CAPITOLO 7 – Le pavimentazioni stradali: funzionalità e composizione

N. ARC	STRADE EXTRAURBANE SECONDARIE-ORDINARIE					
	Numero di passaggi di veicoli commerciali					
Modulo resistente del sottostante	400/0	1.500/02	4.000/00	10.000/02	25.000/00	45.000/000
150 N/mm ²					TRAFFICO NON PREVISTO PER IL TIPO DI STRADA	
90 N/mm ²						
30 N/mm ²						

• • • CALCESTRUZZO AD ARMATURA CONCRETA
f_{cm} = 4,0 N/mm²

□ □ □ MISTO CEMENTATO
□ □ □ MISTO GRANULARE NON LEGATO

10L = 10 mm
P = 10 mm di granulato
T = 10 mm di granulato

PARTE IV– La normativa di settore

CAPITOLO 8– La normativa nel settore delle costruzioni stradali

Prima di affrontare la vera e propria trattazione dei materiali riciclati in ambito stradale, è opportuno riportare e riepilogare le principali normative tecniche e legislative in materia. L'utilizzo dei materiali di scarto come sostituti di aggregati naturali è divenuto economicamente interessante da non molto tempo, ma rappresenta ormai, in molte Regioni, una realtà significativa, avendo trovato motivo di rapido sviluppo nelle crescenti limitazioni all'attività di cava e nei più accurati controlli sulla destinazione dei rifiuti.

In particolare, nel settore dei lavori stradali, gli aggregati granulari riciclati possono essere utilizzati, anche con integrazioni di terre o misti granulari naturali, oltre che per la formazione del corpo del rilevato, anche per costituire gli strati di sottofondo e di fondazione, purché soddisfino le prescrizioni, prima richiamate, definite nelle relative Norme Tecniche e legislative.

In quanto segue è riportata una raccolta delle principali Norme Tecniche e legislative inerenti la produzione e l'impiego di tali materiali.

8.1 Norme tecniche

8.1.1 impianti di produzione

UNI 10006/2002 - APPENDICE B- Costruzione e manutenzione delle strade.

La Norma prescrive che, per ottenere con maggiore certezza costanti risultati in opera, il materiale di riciclo debba mantenere elevati livelli di costanza granulometrica e di composizione.

D.M. 05/02/98, n. 72 - ALLEGATO 1, § 7.1- Individuazione dei rifiuti non pericolosi.

Per quanto concerne lo stoccaggio, la Norma prevede che il materiale debba essere preventivamente macinato, vagliato e selezionato granulometricamente con asportazione delle frazioni metalliche ed

indesiderate in genere. Il prodotto finale dovrà essere composto con inerti di natura lapidea con granulometria idonea aventi un eluato al test di cessione conforme a quanto previsto nell'Allegato 3 del Decreto.

8.1.2. QUALITÀ

UNI EN ISO 9000-1/1994 - Gestione per la qualità e di assicurazione della qualità.

La Norma descrive e chiarisce i concetti principali relativi alla qualità; fornisce una guida per la scelta e l'utilizzazione delle norme relative alla gestione per la qualità, compresi i sistemi qualità.

8.1.3 STOCCAGGIO

UNI 10006/2002 - APPENDICE A.4 - Costruzione e manutenzione delle strade.

La Norma prescrive che i singoli lotti di prodotto pronti per l'utilizzo, o partite, devono essere stoccati su un piano di posa stabile, pulito, regolare e ben drenato, in modo che i risultino ben separati e distinguibili gli uni dagli altri.

8.1.4 CAMPIONAMENTO

UNI EN 932-1/1998 - Metodi di campionamento.

La Norma definisce i metodi per ottenere campioni di aggregati da forniture, da impianti di preparazione e di trattamento, ivi compresi le scorte. I metodi descritti sono altresì adatti per ottenere campioni elementari che possono essere testati separatamente. Sono anche indicate le procedure per la riduzione di campioni. I metodi specificati sono limitati agli utilizzi in Ingegneria Civile.

UNI EN 932-2/2000 - Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio.

La Norma definisce i metodi per la riduzione di campioni da laboratorio di aggregati, a campioni di prova, nei casi in cui la massa della porzione di prova preventivamente sia prescritta con un preciso limite inferiore e con una determinata tolleranza.

CNR B.U. n. 25/1972 - Campionatura di terre e terreni.

La Norma definisce le operazioni necessarie per ottenere un campione rappresentativo di una terra o di un terreno in sito.

UNI EN 10802/2002 - Rifiuti - Campionamento manuale e preparazione ed analisi degli eluati.

La Norma indica il procedimento di campionamento manuale di rifiuti liquidi, granulari, pastosi e fanghi, in rapporto al loro diverso stato fisico e giacitura. Precisa inoltre i procedimenti di preparazione ed analisi degli eluati.

8.1.5 CLASSIFICAZIONE

UNI EN 13285/2004 - APPENDICE A - Miscele non legate - Specifiche

La Norma prescrive che la composizione di miscele contenenti aggregati riciclati dovrebbe essere determinata mediante cernita visiva.

CNR B.U. n. 104/1984 - Identificazione delle rocce più comuni impiegate come aggregati stradali.

In merito alla identificazione delle rocce impiegate nelle costruzioni stradali, la Norma propone la terminologia da utilizzare per la descrizione delle rocce, terminologia dalla quale risulta la natura petrografia della roccia, la sua eventuale alterabilità e la eventuale presenza di minerali dannosi.

PTV406 - Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.

Nella Norma sono contenute le prescrizioni tecniche necessarie a stabilire la categoria di appartenenza (calcestruzzo, conglomerato bituminoso, laterizi...) degli inerti provenienti da riciclaggio in relazione alle norme esistenti ed alle possibili applicazioni in campo stradale.

8.1.6 MISCELE

UNI EN 13285/2004 - Miscele non legate: specifiche.

La Norma, riporta i requisiti di miscele non legate impiegate per la costruzione e la manutenzione di strade, aeroporti e altre aree soggette

a traffico, con riferimenti alla Norma UNI EN 13242. La norma stessa si riferisce solo a miscele non legate di aggregati naturali, artificiali e riciclati costituite da granuli di dimensioni massime comprese tra 8 mm e 80 mm.

8.1.7 CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE

AGI 1994 – Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio.

Queste Raccomandazioni costituiscono una guida alle tecniche ed alle procedure da adottare nelle principali prove di laboratorio.

UNI EN 933-1/1999 - Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per stacciatura.

La Norma, stabilisce le modalità sperimentali per la determinazione della distribuzione granulometrica degli aggregati mediante stacciatura. Si applica agli aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri, costituiti da granuli di dimensione nominale non superiore a 63 mm, esclusi i fillers.

UNI EN 933-3/2004 - Determinazione della forma dei granuli - Indice di appiattimento.

La Norma descrive il procedimento per la determinazione dell'indice di appiattimento degli aggregati e si applica ad aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri. Il procedimento non è applicabile a granuli di dimensioni inferiori a 4 mm o maggiori di 80 mm.

UNI EN 933-4/2001 - Determinazione della forma dei granuli - Indice di forma.

La Norma stabilisce le modalità sperimentali per la determinazione dell'indice di forma degli aggregati grossi di origine naturale o artificiale, compresi gli aggregati leggeri.

UNI EN 933-8/2000 - Valutazione dei fini - Prova dell'equivalente in sabbia.

La Norma, applicabile agli aggregati naturali, definisce le modalità sperimentali per la determinazione del valore di equivalenza in sabbia

della classe granulometrica 0/2 mm degli aggregati fini e degli aggregati misti.

UNI EN 1097-2/1999 - Metodi per la determinazione della resistenza alla frammentazione.

La Norma definisce le procedure per la determinazione della resistenza alla frammentazione degli aggregati grossi. Sono previsti due tipi di prova: la prova Los Angeles (metodo di riferimento) e la prova d'urto (metodo alternativo). La Norma si applica agli aggregati naturali o artificiali impiegati nell'Ingegneria Edile e Civile.

UNI EN 1097-6/2002 - Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua.

La Norma prevede sei metodi: i primi cinque sono applicabili all'aggregato normale mentre il sesto riguarda gli aggregati leggeri.

UNI EN 1367-1/2001 - Determinazione della resistenza al gelo e disgelo.

La Norma indica il metodo di prova con cui acquisire informazioni sul comportamento degli aggregati quando sono soggetti a cicli di gelo e disgelo. La procedura prevista è applicabile ad aggregati aventi dimensioni dei granuli comprese tra 4 mm e 63 mm.

CNR B.U. n. 22/1972 - Peso specifico apparente di una terra in sito.

La Norma indica le modalità sperimentali per la determinazione della massa volumica apparente di una terra in sito secondo specifici metodi da adottare in relazione alle caratteristiche del terreno: metodo del “cilindro”, metodo del volumometro “a sabbia”; metodo del volumometro a “membrana”.

CNR B.U. n. 23/1971 - Analisi granulometrica di una terra mediante crivelli e setacci.

La Norma indica l'insieme delle operazioni necessarie per determinare la distribuzione percentuale in massa dei grani secondo le loro dimensioni.

CNR B.U. n. 27/1972 - Metodo di prova per la misura dell'equivalente in sabbia.

La Norma definisce le modalità sperimentali per la determinazione del valore di equivalenza in sabbia sulla frazione di materiale passante al setaccio n. 4 ASTM.

CNR B.U. n. 95/1984 - Forma di aggregati lapidei.

La Norma stabilisce che la forma di un singolo elemento lapideo sia individuata dai valori dei seguenti parametri: coefficiente di forma, coefficiente di appiattimento e coefficiente di allungamento. Per un insieme di elementi, o grani, costituenti un aggregato, si definiscono i corrispondenti Indice “If” di forma e Indice “Ia” di appiattimento.

CNR UNI 10008/1963 - Prove sui materiali stradali - Umidità di una terra.

La Norma stabilisce le modalità sperimentali per la determinazione dell'umidità di una terra.

CNR UNI 10013/1964 - Peso specifico dei granuli.

La Norma stabilisce le modalità sperimentali per la determinazione della massa volumica “ γ_s ” dei granuli di una terra, definita come il rapporto tra la massa dei granuli ed il loro volume comprensivo degli eventuali pori esistenti all'interno dei granuli stessi non saturabili con acqua.

CNR UNI 10014/1964 - Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra.

La Norma stabilisce le procedure per la determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) e prescrive che le prove vanno eseguite su un campione di materiale terroso passante allo staccio UNI 2332 - 0,425.

CNR UNI 10009/1964 - Prove sui materiali stradali - Indice di portanza C.B.R. di una terra.

La Norma stabilisce la procedura per la determinazione dell'indice di portanza californiano “I.C.B.R.” su un provino di materiale terroso in diverse condizione di umidità, grado di addensamento e composizione granulometrica

ASTM D4429/2004 - Standard Test Method for C.B.R. (California Bearing Ratio) of Soils in Place.

La Norma stabilisce la procedura per la determinazione in sito dell'Indice di portanza C.B.R. adottando la prova ASTM Test Method D 1883.

CNR B.U. n. 34/1973 - Determinazione della perdita in peso per abrasione di aggregati lapidei con l'apparecchio "Los Angeles".

La Norma indica la procedura per la misura della perdita in massa, per abrasione, di un aggregato lapideo sottoposto ad un'azione di rotolamento-urto.

UNI EN 1097-1/2004 - Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati -

Determinazione della resistenza all'usura (micro - Deval).

La Norma specifica la procedura per la misurazione della resistenza all'usura di un campione di aggregato naturale o artificiale per impieghi in opere di Ingegneria Civile.

8.1.8 CARATTERISTICHE CHIMICHE

D.M. 05/02/98, n. 72 - ALLEGATO 3 Test di cessione – Individuazione dei rifiuti non pericolosi.

La Norma prescrive che l'eluizione dei componenti avvenga tramite immersione del campione in acqua deionizzata, la quale viene rinnovata ad intervalli di tempo prestabiliti, per un totale di durata della prova pari a 16 giorni.

UNI 10802/2002 Rifiuti - Rifiuti liquidi, granulari, pastosi e fanghi - Campionamento manuale - Preparazione ed analisi degli eluati.

La Norma indica il procedimento di campionamento manuale di rifiuti liquidi, granulari, pastosi e fanghi, in relazione al loro diverso stato fisico e giacitura.

Specifica inoltre i procedimenti di preparazione ed analisi degli eluati.

UNI EN 1744-1/1999 - Analisi chimica degli aggregati.

La Norma definisce i procedimenti per l'analisi chimica degli aggregati e specifica quali sono le procedure di riferimento e i metodi alternativi in grado di fornire risultati equivalenti. Salvo diversa specifica, i metodi di

prova riportati possono essere utilizzati per controlli di produzione, per prove di conformità o per prove di tipizzazione.

UNI 8520-11/1985 - Aggregati per confezione di calcestruzzi - Determinazione del contenuto di solfati.

La Norma definisce due metodi alternativi per la determinazione del contenuto di solfati solubili in acido negli aggregati da impiegarsi nella confezione di calcestruzzi.

Sono riportate indicazioni sul campionamento, la preparazione del campione, l'apparecchiatura e i reagenti, il procedimento, l'espressione dei risultati e il resoconto di prova.

UNI 8520-14/1984 - Aggregati per confezione di calcestruzzi - Determinazione colorimetrica del contenuto di sostanze organiche negli aggregati fini.

La Norma stabilisce le modalità da seguire per la determinazione approssimata, per via colorimetrica, del contenuto di sostanze organiche negli aggregati fini (sabbia) da impiegarsi nella confezione di calcestruzzi. Sono riportate indicazione sulla preparazione del provino, i reagenti, l'apparecchiatura, il procedimento, l'interpretazione dei risultati e il resoconto di prova.

UNI EN 196-21/1991 - Metodi di prova dei cementi. Determinazione del contenuto di cloruri, anidride carbonica e alcali nel cemento.

La Norma può essere applicata anche ai componenti quali, ad esempio, il clinker e la loppa d'altoforno. Definisce i metodi (di riferimento e alternativi) per la determinazione dei contenuti di cloruri, anidride carbonica e alcali, precisando che nel caso di controversie, sono adottabili solo i metodi di analisi di riferimento.

8.1.9 CARATTERISTICHE DI ACCETTAZIONE

AASHTO M 319-02 - Reclaimed Concrete Aggregate for Unbound Soil-Aggregate Base Course.

La Norma dà indicazioni in merito all'utilizzo di aggregati provenienti dalla frantumazione del calcestruzzo destinati alla formazione di strati di base non legati.

Precisa, in oltre, che tali materiali possono essere impiegati tal quali, miscelati con inerti naturali e contenere percentuali variabili di altre tipologie di materiali come i laterizi.

UNI EN 13242/2004 - Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di Ingegneria Civile.

La Norma specifica i requisiti di aggregati ottenuti mediante processo naturale o industriale oppure riciclati per materiali non legati e legati con leganti idraulici, destinati all'impiego in opere edili o stradali.

CNR B.U. n. 139/1992 - Norme sugli aggregati: criteri e requisiti di accettazione degli aggregati impiegati nelle sovrastrutture stradali.

La Norma definisce i requisiti di accettazione per gli aggregati lapidei da impiegare per la formazione di strati di sovrastrutture stradali.

CNR B.U. n. 176/1995 - Requisiti di accettazione e di posa in opera di misti granulari non legati naturali o corretti o di frantumazione per strati di fondazione o di base.

La Norma costituisce un'integrazione alle prescrizioni contenute nella precedente Norma CNR B.U. 139/1992, per quanto attiene alle proprietà ed ai requisiti di accettazione dei misti granulari non legati per strati di fondazione e di base di sovrastrutture stradali.

PTV 406 - Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.

Nella Norma sono contenute le prescrizioni tecniche necessarie a stabilire la categoria di appartenenza (calcestruzzo, conglomerato bituminoso, laterizi, ecc.) degli inerti provenienti da riciclaggio in relazione alle Normative esistenti ed alle possibili applicazioni nel settore delle costruzioni stradali.

SN 670 141 - Recyclage - Matériaux bitumineux de démolition.

La Norma recepisce le indicazioni della Direttiva OFEFP (Office Federal de l'Environnement, des Forests e du Paysage) in merito alla valorizzazione dei residui di cantiere. Vengono stabilite le tecniche costruttive e le prove che sono necessarie per attestare i requisiti dei materiali. Sono altresì indicate, sia le Direttive per il recupero dei

materiali bituminosi da demolizione sia quelle per la realizzazione di strati in conglomerato bituminoso o di strati di fondazione contenenti materiali bituminosi riciclati.

SN 670 120d – Graves pour couches de fondation.

La Norma fissa i requisiti qualitativi per gli inerti che vengono utilizzati negli strati di fondazione ed inoltre fornisce i valori limite per le caratteristiche meccaniche degli stessi.

SN 670 142 - Recyclage - Matériaux non bitumineux de démolition.

La Norma recepisce le indicazioni della Direttiva OFEFP (Office Federal de l'Environnement, des Forests e du Paysage) in merito alla valorizzazione dei residui di cantiere. Vengono stabilite le tecniche costruttive e le prove che sono necessarie per attestare i requisiti dei materiali. Sono anche indicate, sia le Direttive per il recupero dei materiali da demolizione che non contengono conglomerato sia le indicazioni per la produzione di inerti riciclati da utilizzare in misti granulari per fondazioni stradali.

SN 670 143 - Recyclage - Béton de démolition.

La Norma recepisce le indicazioni della Direttiva OFEFP (Office Federal de l'Environnement, des Forests e du Paysage) relativa alla valorizzazione dei residui di cantiere. Vengono stabilite le tecniche costruttive e le prove che sono necessarie per attestare i requisiti dei materiali. Contiene le direttive per la riduzione del calcestruzzo da demolizione in inerti granulari utilizzabili negli strati di fondazione e di base di sovrastrutture stradali.

SN 670 144 - Recyclage - Matériaux non triés de démolition.

La Norma recepisce le indicazioni della Direttiva OFEFP (Office Federal de l'Environnement, des Forests e du Paysage) relativa alla valorizzazione dei residui di cantiere. Vengono stabilite le tecniche costruttive e le prove che sono necessarie per attestare i requisiti dei materiali. Contiene le Direttive per la preparazione di materiale granulare da utilizzare poi in strati di sottofondi e fondazioni stradali.

8.1.10 CARATTERISTICHE DI ADDENSAMENTO

CNR B.U. n. 69/1978 - Norme sui materiali stradali - Prova di costipamento di una terra.

La Norma stabilisce la procedura sperimentale per la determinazione della massima “massa volumica del secco” della terra, ottenuta mediante costipamento meccanico effettuato secondo modalità normalizzata.

10.1.11 STABILIZZAZIONE CON LEGANTI IDRAULICI

SN 640 509 a - Stabilisation aux liants hydrauliques.

La Norma descrive le diverse applicazioni della stabilizzazione con leganti idraulici e fornisce gli elementi necessari per le pratiche applicazioni. Vengono inoltre descritte le procedure da seguire per la qualificazione, i requisiti per la produzione, la posa in opera e i controlli.

CNR B.U. n. 29/1972 - Norme sui misti cementati.

La Norma suddivide le miscele (inerti, cemento e acqua) in due tipologie e di ciascuna indica i relativi requisiti e le procedure sperimentali per la loro determinazione.

CNR B.U. n. 36/1973 - Stabilizzazione delle terre con calce

La Norma indica i criteri per la stabilizzazione di terre con calce idrata o viva e precisa che la dosatura di calce deve essere tale da modificare in senso migliorativo le caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche della terra.

CNR B.U. n. 97/1984 - Prove distruttive sul calcestruzzo - Prova di resistenza a trazione indiretta.

La Norma stabilisce le modalità sperimentali per la determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini di calcestruzzo indurito. La medesima procedura è utilizzabile anche per determinazioni su provini costituito da misti cementati o da miscele terra-calce.

UNI EN 197-1/2001 – Cemento - Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni.

La Norma definisce e specifica 27 distinti prodotti di cemento comune e i loro costituenti. La definizione comprende anche i requisiti che i costituenti devono rispettare, nonché i requisiti meccanici, fisici e chimici dei 27 prodotti di cemento e le classi di resistenza.

8.1.12 CONTROLLI IN SITO

CNR B.U. n. 22/1972 - Peso specifico apparente di una terra in sito.

La Norma riporta le modalità sperimentali per la determinazione della massa volumica apparente di una terra in sito secondo diversi metodi prova da adottare in relazione alle caratteristiche del terreno: metodo del cilindro, metodo del volumometro a sabbia e metodo del volumometro a membrana.

CNR B.U. n. 146/1992 - Determinazione del modulo di deformazione M_d e M_d' mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare.

La Norma stabilisce le modalità sperimentali da seguire per la determinazione in sito dei valori dei moduli di deformazione al primo ciclo di carico (M_d) e al secondo ciclo di carico (M_d').

UNI EN 13036-7/2004 - Misurazione dell'irregolarità delle pavimentazioni - Misura con il regolo.

La Norma stabilisce la procedura e l'attrezzatura di prova per misure di irregolarità attribuibili a difetti qualitativi in strati superficiali o subsuperficiali di sovrastrutture stradali o aeroportuali. Il metodo di prova previsto dalla Norma non è applicabile per ottenere informazioni sull'irregolarità generale della struttura.

ASTM D4694/1996 - Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device.

La Norma indica una procedura standardizzata di rilievo che consiste nella misurazione delle deflessioni verticali di superfici pavimentate o non, prodotta da un carico di tipo impulsivo trasmesso da una massa battente. Le deflessioni sono misurate mediante geofoni (di norma in numero di 7) di cui uno posizionato al centro della piastra di carico e gli altri disposti radialmente a distanza variabile.

ASTM D4695/2003 - Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements.

La Guida fornisce la procedura che deve essere adottata per la misurazione delle deflessioni superficiali di sovrastrutture stradali o aeroportuali, noto che dia il carico applicato, sia esso di natura statica o

impulsiva. Le deflessioni verticali sono misurate da geofoni. La Guida fornisce anche le informazioni generali che si da adottare a prescindere dalla specifica metodologia di prova adottata.

8.1.13 TERMINOLOGIA

CNR B.U. n.139/1992 - Criteri e requisiti di accettazione degli aggregati stradali impiegati nelle sovrastrutture stradali.

La Norma contiene anche la terminologia relativa agli aggregati.

CNR B.U. n. 169/1995 - Istruzioni sull'uso della terminologia relativa alle pavimentazioni ed ai materiali stradali.

Lo scopo Norma è indicare la terminologia da usare relativamente alle sovrastrutture ed ai materiali stradali.

SN 670 062 - Recyclage - Généralités.

La Norma definisce la terminologia e fissa i requisiti dei materiali di recupero e degli strati con essi costituiti.

UNI 10006/2002 - CAPITOLO 1 Termini e definizioni - Costruzione e manutenzione delle strade.

La Norma fornisce le definizioni relative alle proprietà fisiche e morfologiche dei materiali, nonché agli strati componenti il corpo stradale.

UNI EN 13242/2004 – Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici.

La Norma fornisce le definizioni dei tipi di aggregati, delle loro dimensioni e proprietà fisiche.

UNI EN 13285/2004 - Miscele non legate.

La Norma fornisce le definizioni di miscela non legata, di categoria di granulometria e di lotto.

8.2. – La legislazione in Italia

Di seguito vengono riportate le principali normative italiane in ambito dei rifiuti con particolare riferimento a quelli da Costruzione e Demolizione, evidenziando gli articoli che rivestono particolare interesse al fine del recupero, del trattamento e della classificazione degli stessi.

Decreto legislativo 5 febbraio 1997, n.22 “Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CEE sugli imballaggi”

È il decreto quadro (Decreto Ronchi) sul quale si basano tutte le attività legislative successive. Trae la sua origine dalla normativa europea sui rifiuti.

Riveste particolare importanza ai fini del trattamento e del rimpiego dei rifiuti da Costruzione e demolizione l'art.4 in cui viene stabilito che le autorità competenti devono favorire ed incentivare le attività di recupero e riciclaggio dei rifiuti, anche attraverso la stipula di accordi con i soggetti economici interessati alle suddette attività, con la possibilità di stabilire agevolazioni in materia di adempimenti amministrativi ed il ricorso a strumenti economici, secondo le modalità specificate al successivo art.25. Al Capo IV del decreto vengono invece definito l'iter da seguire per ottenere l'autorizzazione alla realizzazione ed all'esercizio di impianti di smaltimento e recupero dei rifiuti e le autorizzazioni necessarie per la realizzazione di impianti di ricerca e sperimentazione.

Negli art. 31 e 33 sono definite le procedure semplificate per l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti.

Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998 “Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del Decreto legislativo 5 febbraio 1997, n.22”

Il Decreto, in merito al recupero di materiali individuati all'allegato 1 (a tal fine si veda quanto già descritto nei paragrafi precedenti), all'art.3 stabilisce che le attività, i procedimenti tesi al riciclaggio ed al recupero

di tali materiali devono garantire materie prime o materie prime secondarie con caratteristiche merceologiche conformi alla normativa di settore e nelle forme usualmente commercializzate. I rifiuti provenienti dal recupero e dal riciclaggio dei rifiuti non devono presentare caratteristiche di pericolo superiori a quelle dei prodotti e delle materie derivanti dall'utilizzo di materie prime vergini.

Decreto Ministeriale 25 ottobre 1998 n.471 “Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell’art.17 D.Lgs n.22/97 e successive modificazioni ed integrazioni”

In tale decreto vengono disciplinate le modalità e le procedure da seguire per l'esecuzione degli interventi di bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati. Per quanto riguarda i rifiuti da Costruzione e Demolizione riveste particolare importanza l'Allegato 3 che al punto d) prevede il riutilizzo del suolo e dei materiali eterogenei sottoposti a trattamenti off-site sia nel sito medesimo che in altri siti che presentino le caratteristiche ambientali e sanitarie adeguate, e che al punto l) prevede invece di privilegiare negli interventi di bonifica e ripristino ambientale l'impiego di materiali organici di adeguata qualità provenienti da attività di recupero di rifiuti urbani.

Hanno inoltre riferimenti e interazioni con le attività di recupero dei Rifiuti da Demolizione e Costruzione più che altro per casistiche o per situazioni particolari le seguenti norme:

D.M. 14/05/96 - Normative e metodologie tecniche per gli interventi di bonifica, ivi compresi quelli per rendere innocuo l'amianto, previsti dall'art. 5, comma 1, lettera f), della legge 27 marzo 1992, n. 257, recante: "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto".

D.P.R. 554/99 - Regolamento di attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici, ai sensi dell’art. 3 della L. 11/02/94 n. 109 e successive modificazioni.

L. 27/03/92 - Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto.

CAPITOLO 8– La normativa nel settore delle costruzioni stradali

A tali normative, valide in campo nazionale, si affiancano le normative regionali specifiche.

PARTE V – il riciclaggio nella realizzazione di pavimentazioni stradali

CAPITOLO 9- Considerazioni generali sul riciclaggio

La richiesta di materiale per la manutenzione e realizzazione di pavimentazioni stradali è in continuo aumento. In particolare nel caso delle manutenzioni bisogna tenere in conto che esse si logorano per diverse ragioni; le due cause più importanti sono rappresentate dai fattori ambientali e dal carico del traffico.

Nel corso degli ultimi decenni le infrastrutture hanno avuto uno sviluppo notevole: il trasporto su strada è aumentato, in particolar modo il volume relativo ai veicoli pesanti, che movimentano le merci con maggior rapidità e flessibilità rispetto ad un trasporto su rotaia; la tipologia stessa dei veicoli è cambiata, ed il carico per asse di un mezzo pesante, è di gran lunga maggiore rispetto al passato; il deterioramento già presente sulle nostre strade, viene così ad accentuarsi, rendendo inevitabili gli interventi di manutenzione.

I raggi ultravioletti del sole, inoltre, provocano, in modo continuo, un lento indurimento del bitume; questo a sua volta causa una riduzione dell'elasticità con la formazione di fessure nel momento in cui il manto si contrae in seguito al raffreddamento. Una volta che il manto ha perso la propria capacità strutturale a causa delle suddette fessure, la pavimentazione tende a deteriorarsi ad un ritmo sempre crescente per effetto della penetrazione dell'acqua.

Ogni veicolo in transito provoca una lieve deformazione temporanea alla struttura della pavimentazione. La deformazione indotta da un veicolo leggero è talmente piccola da essere irrilevante mentre i veicoli ad elevato carico provocano deformazioni relativamente ampie. Il passaggio di numerosi automezzi ha un effetto cumulativo che genera gradualmente deformazioni permanenti e/o incrinature da fatica. Assai sovraccaricati causano un numero sproporzionato di danni alla struttura della pavimentazione, accelerando così il fenomeno di deterioramento. Una volta che l'incrinatura s'insinua attraverso il manto protettivo, l'acqua penetra nella struttura sottostante della pavimentazione. L'effetto

CAPITOLO 9- Considerazioni generali sul riciclaggio

d'ammorbidimento dell'acqua comporta una riduzione della resistenza che a sua volta provoca un aumento del grado di deterioramento.

Inoltre, l'acqua trasmette prevalentemente carichi ruota verticali sotto forma di pressioni che erodono rapidamente la struttura del materiale granulare e provocano la separazione del bitume dall'aggregato d'asfalto. In queste condizioni le frazioni fini del materiale della pavimentazione sono espulse verso l'altro attraverso le incrinature, con il conseguente sviluppo di vuoti d'ampie dimensioni all'interno della pavimentazione. La formazione di buche e il rapido deterioramento della pavimentazione sono l'immediata conseguenza del logorio della sede stradale. In quei casi in cui la temperatura scende sotto i 4°C, l'eventuale acqua presente nella pavimentazione, si espande creando pressioni idrauliche, persino in assenza dei carichi delle ruote. La deformazione causata da ripetuti cicli gelo/disgelo rappresenta l'aspetto più grave per una pavimentazione caratterizzata da fessure; ne consegue il disfacimento.

Un'ulteriore causa della fessurazione superficiale, in modo particolare dei manti sottili d'asfalto, è legata alla mancanza di traffico. Un'azione di "impastamento" del traffico mantiene "vivo" il bitume. Un'ossidazione e il conseguente indurimento di tale materiale provocano la formazione di fessure termiche a livello della superficie bitumata. La continua esposizione a sollecitazioni del bitume provoca una tensione tale da chiudere queste fessure non appena si formano, evitandone così la propagazione.

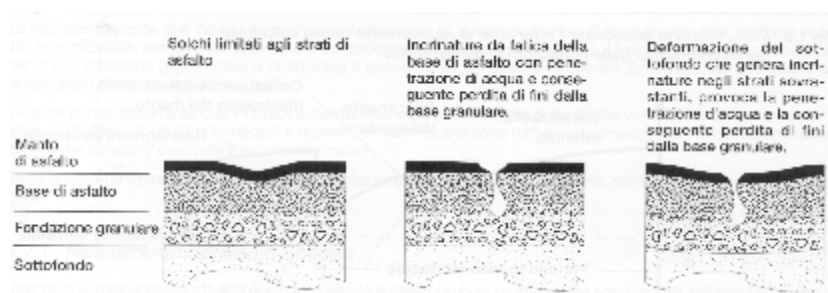


Figura 1 - deterioramento del manto stradale

Gli interventi di manutenzione della pavimentazione consistono solitamente nell'evitare che l'acqua penetri all'interno della struttura della strada. A tale scopo, è necessario che il manto sia sempre impermeabile e

CAPITOLO 11- Considerazioni generali sul riciclaggio

che i provvedimenti di drenaggio siano efficaci al fine di impedire che l'acqua non si depositi lungo il ciglio stradale.

Le fessure, devono essere sigillate non appena compaiono e i margini della strada devono essere rifilati per consentire lo scolo dell'acqua.

Affrontati con un certo anticipo, gli effetti dell'invecchiamento possono essere trattati efficacemente mediante la nebulizzazione d'emulsione bituminosa. In caso di condizioni più gravi si può applicare un impermeabilizzante d'emulsione e graniglia, qualora il volume del traffico sia ridotto, oppure un sottile rivestimento tradizionale d'asfalto miscelato a caldo.

Tali provvedimenti, che mirano a conservare la flessibilità e la durata del manto stradale, risolvono, in realtà, soltanto il deterioramento dovuto alle condizioni ambientali.

Le deformazioni e le incrinature da fatica causate dal carico del traffico non possono essere trattate in modo efficace mediante trattamenti superficiali di manutenzione ma richiedono interventi di risanamento più profondo.

La decisione sul tipo d'intervento cui ricorrere per migliorare la pavimentazione stradale, o semplicemente per garantirne le condizioni di transitabilità, è spesso dettata da vincoli legati al budget. Provvedimenti di conservazione a breve termine sono indispensabili. Lasciare che la pavimentazione si deteriori ulteriormente è generalmente la decisione peggiore a causa dell'aumento esponenziale di deterioramento col trascorrere del tempo.

I dati sono impietosi: nel 2006 si usavano 44 milioni di bitume per la manutenzione, oggi solo 21, come nel 1985. Queste cifre, abbinate alla crescita dei volumi di traffico, raccontano lo scenario. Basta percorrere le nostre arterie per averne conferma.

CAPITOLO 9- Considerazioni generali sul riciclaggio



Figura 2 – caso di deterioramento del manto stradale

Uno studio SITEB (Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade) evidenzia la fase recessiva nella manutenzione.

Oggi, in Italia, ci vorrebbero almeno 40 milioni di tonnellate di bitume per tenere in ordine la situazione.

Lo studio mette in luce il fatto che, come pure nel 2014 non si sia arrestata la fase recessiva (accade ininterrottamente da 8 anni), che ha portato dalle 44 mln di tonnellate di asfalto alle circa 21,8 dello scorso anno (-2% vs 2013); un ennesimo record negativo che ci porta al 1985, quando il parco circolante era ovviamente più ridotto e gli investimenti sul patrimonio stradale molto più contenuti. Si prendono in considerazione un totale di 850.000 km tra strade principali extraurbane, cittadine, secondarie o private.

Attualmente, per tenere in ordine le nostre strade occorrerebbe impiegare almeno 40 mln di tonnellate annue, addirittura 18 in più di quelle utilizzate lo scorso anno.

Tuttavia con la crisi economica che in questo periodo si sta affrontando, si rende necessario aumentare la redditività dei ridotti budget disponibili da parte dei singoli paesi; se consideriamo anche il fatto che questa tipologia di interventi comporta notevoli consumi di risorse pregiate e non rinnovabili, quali aggregati lapidei e bitume, e che vengono contestualmente prodotti ingenti quantità di materiali di risulta, con costi sia economici di dismissione, che ambientali di inquinamento, si rende ancora più necessaria la ricerca di una soluzione alternativa al problema.

Questa soluzione arriva infatti con il *riciclaggio*; nel settore delle pavimentazioni stradali col termine “riciclare”, si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato, per la

CAPITOLO 11- Considerazioni generali sul riciclaggio

produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Le motivazioni che spingono verso questa direzione, sono molteplici:

- riduzione dell'impiego di materie prime vergini;
- riduzione dei territori da destinare a discarica;
- limitazione dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera, derivante dal trasporto e dall'incenerimento dei rifiuti;
- conservazione dell'energia;
- vantaggi economici;
- vantaggi tecnici.

Tuttavia In Italia, al contrario di come avviene in molti altri paesi industrializzati, la tecnica del reimpiego del fresato non ha avuto ancora un largo utilizzo. Da una stima approssimata sulla quantità di materiale di recupero proveniente dalla demolizione delle pavimentazioni stradali degradate, risulta che la quantità di conglomerato bituminoso fresato è pari a circa 12 milioni di tonnellate, su un totale di quasi 40 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso prodotto annualmente, con una percentuale di reimpiego stimata intorno al 15% (circa 1.8 milioni di tonnellate). Tale dato risulta molto inferiore rispetto a quello dei maggiori paesi sviluppati, dove si recupera oltre l'80% dello stesso materiale fresato.

<i>Paese</i>	<i>Produzione annuale di Conglomerati t x 10⁶</i>	<i>Produzione annuale di Fresato t x 10⁶</i>	<i>Produzione annuale Impiego di fresato %</i>
Francia	38,0	7,0	25
Germania	63,5	16,0	80
Svizzera	4,7	1,8	30
Paesi Bassi	7,5	3,0	100
Regno Unito	27,5	8,0	90

CAPITOLO 9- Considerazioni generali sul riciclaggio

Usa	5151,0	50,0	80
Giappone	70,1	22,0	80
Italia	36,3	12,0	15

TABELLA 1 - Produzione annuale di conglomerato bituminoso in alcuni paesi e percentuali del materiale recuperato

9.1- Il riciclaggio in Italia nel settore stradale

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali ha inizio in Italia all'incirca negli anni '70 in concomitanza della crisi petrolifera. In tale periodo si sviluppò la tecnica della fresatura degli strati superficiali.

La prima metodologia utilizzata fu quella della fresatura a caldo, ottenuta mediante un riscaldamento ed una successiva demolizione di 5 o 6 cm della pavimentazione superficiale, con l'utilizzo di speciali pettini.

Ciò permise di non dover innalzare le barriere laterali in quanto, con tale sistema, a differenza della sovrapposizione di un nuovo strato superficiale sopra la vecchia pavimentazione, non si aumentava la quota della strada.

La presenza però di notevoli contenitori di gas su strada, per la fresatura a caldo, e la limitatezza dello spessore di scarifica, hanno spinto i ricercatori a rivolgere i loro studi verso tecnologie meno pericolose e più produttive.

Nel 1983 infatti, sulla Roma-Civitavecchia iniziarono i primi lavori di riciclaggio in situ con impianti mobili molto simili a quelli fissi, con una produttività di 120 tonn/ora, che raggiungevano profondità di più di 10 cm con impiego di frese a freddo, e che riuscivano a riciclare fino all'80% del materiale di recupero, da integrarsi con un 20% di inerti vergini, per la correzione della curva granulometrica di progetto; il primo treno di riciclaggio in Italia fu sviluppato ad opera della **Pavimental**¹, già

¹ Pavimental opera da oltre 40 anni nel settore della costruzione, manutenzione e ammodernamento di strade, autostrade, ponti, viadotti, aree di servizio ed aeroporti.

È leader italiano nello sviluppo di materiali e tecnologie per le pavimentazioni stradali.

Nata nel 1970 con il nome COSAT, *Costruzioni Stradali Asfalti S.p.A.*, nel 1983 prende il nome di Pavimental S.p.A.. Oggi l'attività di direzione e coordinamento è esercitata da Atlantia S.p.A., che detiene il 59,4% del capitale sociale. Autostrade per l'Italia S.p.A. e Aeroporti di Roma S.p.A. detengono ciascuna il 20,0% del capitale sociale e Astaldi S.p.A. detiene un'ulteriore quota pari allo 0,6%.

Punto di riferimento per la manutenzione e l'ampliamento degli oltre 3.000 km di rete autostradale in Italia, Pavimental mira a rafforzare la sua presenza internazionale sia in Polonia, dove è presente dal 2008 con la

CAPITOLO 9- Considerazioni generali sul riciclaggio

menzionata nell'introduzione per la disponibilità data nel fornire dati per la stesura di questa tesi.

Il primo impianto fisso di riciclaggio invece, è da attribuirsi agli inizi degli anni '80, che permise la realizzazione di un importante intervento manutentorio dell'intera pista n.1 dell'aeroporto di Fiumicino: in questa tipologia di impianto, il materiale di recupero, ottenuto dalla dismissione di pavimentazioni bituminose, veniva portato nel cantiere fisso e riciclato, in quantità che al massimo si aggiravano attorno al 40-50%.

Sempre nel 1983, sono stati realizzati i primi interventi di recupero di materiali granulari di fondazione o sottofondazione, con demolizione e miscelazione in situ, con cemento e calce, e con un riutilizzo del 100% del materiale di scarifica (Autostrada I.R.I.-tratto Magliano Sabina-Fiano).

Tra il 1984 e il 1990, lungo la rete autostradale I.R.I., furono eseguite notevoli opere di recupero, per un totale di 2,5 milioni di tonnellate di materiale riciclato a caldo, ma fresato a freddo; il sistema fu favorevolmente adottato anche da altre Amministrazioni italiane, e furono nel complesso utilizzati 13 treni mobili in tutta Italia, di cui 5 della sola Autostrada I.R.I., mentre nel Mondo ben 30.

Sempre nello stesso periodo, nel programma di ampliamento a tre corsie nei tratti Bergamo-Brescia, Bologna-Rimini, Roma-Frosinone, Capua-Napoli, fu utilizzato materiale di recupero fresato, per misti granulari.

Nel 1989 ebbero inizio in Italia i primi tentativi di riciclaggio delle pavimentazioni bituminose, totalmente a freddo, sia per la fresatura che per il confezionamento, con emulsioni bituminose, mediante un apposito treno di riciclaggio, dalla produzione oraria di ben 250 tonn/ora; l'unico difetto della tecnologia, era rappresentato dai lunghi tempi di attesa per la riapertura al traffico, anche di 3-4 giorni, a cui ragionevolmente seguirono nuovi studi ed esperimenti in materia.

Ampliare questo mercato e indirizzarlo dal punto di vista della salvaguardia ambientale, comporta innanzitutto:

controllata Pavimental Polska Sp.zo.o., sia nei mercati dell'Est Europa, del Medio Oriente e del Sud America.

La società è azionista di maggioranza del Consorzio Stabile Co.Im.A. – Costruzioni Impianti Autostradali S.c.a r.l. costituito insieme alle società Autostrade Tech S.p.A. e Pavimental Polska Sp.zo.o.. Attualmente l'Azienda impiega c.a. 600 dipendenti con un valore della produzione pari a 512 milioni di euro generato da tre linee di business principali:

CAPITOLO 11- Considerazioni generali sul riciclaggio

- progettare le nuove pavimentazioni stradali con il criterio di riutilizzare tutto il materiale di risulta, in tutti i cicli di manutenzione futuri;
- avvalersi il più possibile di tecniche che mirino al recupero del 100% del materiale;
- adottare tecnologie che salvaguardino il più possibile l'ambiente, e sotto tutti gli aspetti.

Relativamente a quest'ultimo punto, si pone quindi maggior attenzione a quelli che sono i processi di riciclaggio in situ, con lo scopo di minimizzare non solo i costi, ma anche l'inquinamento ambientale e i consumi energetici, che deriverebbero dai continui trasporti tra cantiere e impianto fisso.

Un'altra problematica da non sottovalutare, è quella delle code che un cantiere stradale genera in fase di manutenzione; i tempi di attesa riguardano infatti non solo gli automobilisti, ma anche gli autocarri, anch'essi incappati nelle code, che riforniscono i cantieri stessi di materiali: ne deriva un crollo della produttività, anche di 5 volte inferiore, ed un allungamento dei tempi di manutenzione, di disturbo, e di conseguente ripristino della strada. Sono da preferirsi, a maggior ragione, lavorazioni con treni di riciclaggio in situ, che riutilizzando il materiale recuperato al 100%, e limitano il rifornimento dall'esterno ai soli acqua e legante (5%).

Nonostante gli studi, le ricerche, le sperimentazioni effettuate in materia, il riciclaggio tarda a spiccare il volo, soprattutto in Italia, e dal punto di vista dell'AIPCR, Associazione Mondiale Della Strada, ciò è attribuibile a diversi fattori, tra cui ricordiamo:

- carenza di normativa tecnica di riferimento;
- legislazione e inadeguata;
- scarsa conoscenza da parte della stazione appaltante, dei vantaggi ottenibili dalle tecniche, anche a causa della loro modesta diffusione;

CAPITOLO 9- Considerazioni generali sul riciclaggio

- un comune convincimento che materiali e tecniche di riciclaggio, siano più onerosi rispetto a quelli tradizionali.
Probabilmente dovrebbero essere proprio gli strumenti normativi, i primi a porre vincoli restrittivi sulla messa a discarica di materiale, con lo scopo di indirizzare il paese a favore del riciclaggio, e mostrando una sensibilità ambientale, che spontaneamente tarda ad arrivare.

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

Le tecniche oggi a disposizione nell'ambito del riciclaggio, possono essere macroscopicamente divise in:

Riciclaggio in impianto fisso

Riciclaggio in situ

ed in relazione agli scambi energetici presenti all'atto del confezionamento del nuovo conglomerato, in:

Riciclaggio a caldo

Riciclaggio a freddo.

A queste due ultime tipologie, se ne aggiunge però una terza, relativa a miscele bituminose tiepide; quest'ultima tecnologia è attualmente disponibile solo in impianti fissi, e sarà pertanto veramente efficiente quando ne sarà possibile la diffusione in impianti mobili.

Relativamente alle altre tipologie invece, esse possono combinarsi tra loro, potendo avere sia negli impianti fissi che negli impianti mobili, possibilità di riciclaggio sia a caldo che a freddo.

Rispetto alle tecniche tradizionali a caldo, come già accennato, il riciclaggio consente un risparmio di risorse non rinnovabili, come aggregati lapidei e bitume, ma anche di tutti i consumi relativi alla loro produzione, come impianti di frantumazione primaria o secondaria.

La demolizione delle pavimentazioni, non comporta più un consumo di risorse per lo smaltimento del fresato stesso e per la gestione dell'area di scarica: il materiale viene riutilizzato, sia a caldo che a freddo.

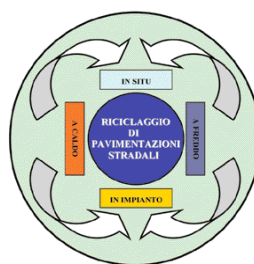


Figura 1 – ciclo produttivo

Le tecniche in situ, inoltre, annullano il trasporto del fresato dal cantiere all'impianto, e conseguentemente del conglomerato

dall'impianto al cantiere, permettendo un riutilizzo del materiale fino al 100% nel caso di riciclaggio a freddo.

La stessa distinzione fra riciclaggio a caldo o a freddo, caratterizza un maggior o minor consumo energetico, che si ripercuote direttamente sia sull'aspetto economico, ma anche su quello ambientale.

Più nello specifico analizzeremo quali siano i vantaggi e gli svantaggi che accompagnano queste tecnologie, e di quale avvalersi a seconda del caso, di volta in volta.

10.1 – Riciclaggio a caldo in impianto

Per riciclaggio a caldo si intendono tutte quelle tecniche che permettono il riutilizzo del conglomerato bituminoso in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, sia preventivamente riscaldato e portato ad un'idonea temperatura, ossia oltre i 150°C. Tutte le restanti tecniche sono da considerarsi fredde o tiepide.

Nel riciclaggio a caldo si ottengono miscele, composte da:

- aggregati lapidei vergini;
- fresato in proporzioni variabili (come se fosse una selezione di aggregati);
- bitume tradizionale o modificato;
- eventuali **ACF** (Additivi Chimici Funzionali), per ringiovanire il bitume invecchiato.

Questa tipologia di miscela è confezionata in impianti fissi di produzione, le cui caratteristiche sono note, grazie ad un corretto dosaggio dei suoi componenti; la tecnica è senza dubbio quella che conferisce prestazioni più elevate al conglomerato riciclato, e che lo rendono idoneo per ogni tipo di impiego, dallo strato di base a quello di usura.

Per quanto riguarda le caratteristiche di tali impianti, è necessario suddividerli in due grandi categorie, a seconda che la miscelazione sia realizzata in modo discontinuo o continuo.

Nel primo caso gli inerti, dopo essere stati essiccati, vagliati e pesati, vengono mescolati tra loro e col bitume fino ad ottenere un impasto omogeneo; il conglomerato ottenuto viene poi scaricato dal mescolatore.

Nel secondo caso gli aggregati, dopo i preliminari trattamenti, vengono prelevati direttamente dai silos mediante saracinesche e alimentatori a nastro ed immessi, insieme al bitume, in un mescolatore ad azione continua.

La miscela, in entrambe i casi, fuoriesce dalla zona di mescolamento mediante un apposito convogliatore, e può essere trasportata alle tramogge di carico e quindi direttamente agli automezzi, oppure inviata ad un silos per lo stoccaggio provvisorio.

L'impianto discontinuo per la produzione di conglomerato bituminoso, è certamente il più diffuso in Europa, consente una maggior flessibilità di utilizzo, ma anche una miglior qualità del prodotto finito; si riesce ad avere anche un controllo superiore dell'emissione dei fumi, grazie alla presenza del filtro.

Di contro, è un impianto molto costoso, a causa della presenza della torre di mescolazione, del vaglio vibrante, degli elevatori a caldo per il filler e per gli aggregati; inoltre, a parità di condizioni iniziali, è caratterizzato da una produttività inferiore.

Anche la modalità di introduzione del fresato nella miscela può essere eseguita sia a caldo che a freddo.

Per grandi linee, il processo produttivo per un impianto del tipo descritto può essere schematizzato nel seguente modo:

Le materie prime da immettere nel ciclo produttivo non sono confezionate in loco, ma vengono generalmente comprate da ditte esterne e stoccate in apposite aree ai margini dell'impianto stesso. Da qui vengono dosati i quantitativi per le singole pezzature, destinate alla miscelazione con il bitume, trasportate mediante pale meccaniche e successivamente caricate in apposite tramogge, detti predosatori, che alimentano con nastri trasportatori un essiccatore, ovvero un forno a tamburo.

Negli impianti a mescolamento discontinuo la dosatura degli inerti viene effettuata solitamente a peso: il dosatore è costituito da una tramoggia a bilico.

Il forno essiccatore, si presenta come un cilindro d'acciaio rotante, inclinato nel senso di avanzamento del materiale, con apposita palettatura interna che solleva il materiale stesso e lo fa cadere attraverso la fiamma del bruciatore, riscaldandolo e liberandolo dall'umidità. Esso rappresenta il cuore del sistema di produzione: infatti dall'efficienza dell'essiccatore dipende interamente la capacità produttiva dell'impianto.

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

La funzione principale dei forni è quella di eliminare l'umidità contenuta negli inerti, in una prima fase, e di portarli, in seguito, alla temperatura di mescolazione voluta.

I forni a tamburo rotante, sono costituiti da un cilindro rotante e da un bruciatore, e sono in grado di operare sia in "equicorrente" che in "controcorrente"; generalmente gli equicorrente vengono utilizzati per impianti di asfalto di tipo "continuo", mentre i controcorrente vengono utilizzati negli impianti tradizionali o di tipo "discontinuo", come nel nostro caso.

Un forno a tamburo rotante che operi in controcorrente può essere schematicamente diviso in tre zone:

1. nella prima, gli inerti vengono riscaldati fino a raggiungere la temperatura di ebollizione dell'acqua, ma non perdono umidità;
2. nella seconda, gli inerti perdono tutta l'umidità contenuta, essiccandosi: in questa zona la temperatura non aumenta, ma rimane costante;
3. nella terza, la temperatura degli inerti, oramai completamente essiccati, aumenta fino a che il materiale non esce dal cilindro.

Durante la fase di lavorazione, all'interno del tamburo, si forma una considerevole quantità di gas contenenti aria, polveri e prodotti della combustione, che vengono espulsi in atmosfera, previa purificazione, attraverso un condotto collegato alla ciminiera.

Quando gli aggregati caldi (150-160°C) lasciano l'essiccatore, cadono in un elevatore a tazze che li trasporta nella parte più alta della torre di mescolazione contenente il vaglio vibrante, a seguito del quale è collocato il mescolatore.

Il bitume viene invece trasportato in stato semisolido da autocisterne, ed è stoccato in serbatoi metallici, coibentati con lana di roccia ad alta densità e rivestiti con un mantello di alluminio, posti in aree ben delimitate; inoltre sono predisposte con lo scarico di fondo, per un eventuale collegamento in serie di più cisterne tra loro.

Il bitume viene riscaldato a 130-150°C dalla caldaia oleotermica alimentata con olio combustibile B.T.Z. (olio denso a Basso Tenore di Zolfo) e successivamente mantenuto a temperatura costante con olio diatermico per omogeneizzarne la composizione.

Tramite una pompa volumetrica viene poi inviato e dosato nel mescolatore.

Una volta ottenuti i giusti quantitativi di bitume e di aggregati vergini, si passa alla miscelazione vera e propria del materiale: un recipiente ospita un doppio albero a palette controrotanti, che agitano la miscela di pietrischi, bitume e filler per un tempo variabile da 35 a 50 secondi, in base alla potenzialità della macchina e all'umidità residua; i miscelatori sono in genere costituiti da vasche con il fondo apribile per lo scarico del materiale impastato, che mediante un apposito convogliatore, può essere trasportato alle tramogge di carico e quindi direttamente agli automezzi, oppure inviato ad un silos per lo stoccaggio provvisorio.

È evidente come gli impianti discontinui sopra descritti, possano essere facilmente modificati nel caso di riciclaggio a caldo; ciò che si deve evitare in questo caso è il passaggio del materiale fresato contenente bitume attraverso la fiamma del bruciatore del cilindro essiccatore (si rischia di crackizzare il bitume e di immettere in atmosfera sostanze nocive).

Le percentuali di materiale riciclabile nella miscela variano in relazione all'impianto utilizzato e agli equipaggiamenti di cui lo stesso dispone, alla natura del materiale fresato (anche detto **RAP, Reclaimed Asphalt Pavement**) e alle sue condizioni operative (temperatura, umidità), ed infine alla modalità di immissione nella miscela, a freddo o a caldo, a seconda che sia previsto o meno, il riutilizzo del fresato mediante riscaldamento.

Ricordiamo che per fresatura si intende quella tecnica che permette di asportare una profondità determinata della sovrastruttura, mediante appositi macchinari, detti generalmente frese: mediamente la larghezza massima di fresatura è di 4,20 mt, mentre lo spessore massimo è di 30 cm.

Le soluzioni di riciclaggio utilizzate più largamente sono le seguenti:

- introduzione del riciclato freddo al piede dell'elevatore caldo, normalmente impiegato per percentuali fino al 15-20%. Sono sufficienti un dosatore volumetrico o ponderale ed un nastro trasportatore. Il vaglio rielezionatore dell'impianto viene escluso;

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

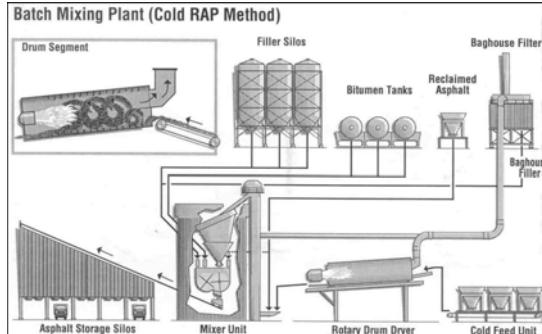


Figura 2 - Impianto di riciclaggio a caldo con introduzione del RAP al piede dell'elevatore

- introduzione del riciclato nel cilindro essiccatore, attraverso un apposito anello di riciclaggio, che consente di raggiungere percentuali fino al 35%.
L'alimentazione viene effettuata mediante un dosatore ed un nastro trasportatore ed è possibile garantire le esatte proporzioni di materiale vergine e riciclato, inserendo sui rispettivi nastri alimentatori stazioni di pesatura interconnesse. Anche in questo caso è interdetto l'utilizzo del vaglio;

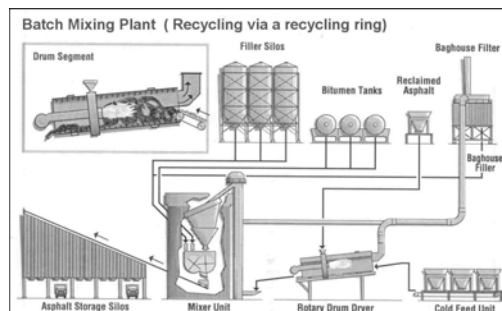


Figura 3 - Impianto di riciclaggio a caldo con introduzione del RAP attraverso un apposito anello

- introduzione del riciclato a freddo, ossia a T ambiente, nella vasca di miscelazione, attraverso una tramoggia tampone installata sulla torre (di mescolazione). La tramoggia tampone viene alimentata mediante un dosatore, un nastro trasportatore ed un elevatore a

tazze. Nel miscelatore, al fresato vengono aggiunti gli aggregati vergini surriscaldati; qui avviene lo scambio termico tra i due materiali, con diminuzione della T del prodotto finale, in funzione del tasso di materiale riciclato utilizzato, della sua umidità e della stessa T ambiente. Il metodo è utilizzato per percentuali di fresato fino al 10-20%. È consentito l'utilizzo del vaglio;

- combinazione ed utilizzo contemporaneo dei due metodi suddetti (RAP nell'anello del cilindro essiccatore e RAP freddo nel mescolatore) per raggiungere percentuali di riciclato fino al 40% complessivi;
- essiccazione e riscaldamento del riciclato, fino a 110/130°C, in uno speciale essiccatore in equicorrente, provvisto di camera di combustione esterna per salvaguardare al meglio le caratteristiche del bitume nella fase di scambio termico. Il materiale scaricato dall'essiccatore viene immesso in una tramoggia tampone riscaldata e coibentata, e di qui dosato nella tramoggia di pesatura degli inerti vergini. Viene successivamente immesso nella vasca di miscelazione insieme agli aggregati nuovi, leggermente surriscaldati, affinché il prodotto finale raggiunga una temperatura di circa 160°C. Si ottengono percentuali di riciclaggio attorno al 50%, sempre in relazione alla qualità del fresato. Rimane consentito l'utilizzo del vaglio.

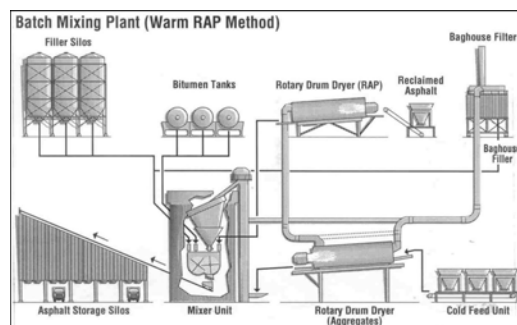


Figura 4 - Impianto di riciclaggio a caldo con speciale essiccatore in equicorrente per il RAP

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

Risulta chiaro dagli esempi sopracitati, come, nel caso in cui il fresato sia stato preventivamente riscaldato all'interno di un forno separato, a fronte del maggior costo per la fase produttiva, si potranno raggiungere percentuali di RAP maggiori rispetto al peso totale; nel caso di aggiunta a freddo invece, il calore proviene dal riscaldamento degli inerti di primo impiego a circa 250°C, e pertanto la quantità di materiale riciclato sarà più limitata. In quest'ultimo caso però si ha il vantaggio di poter avere un maggior controllo sulla granulometria degli inerti, mediante vagliatura e selezione del fresato di dimensioni minori, al fine di produrre conglomerati bituminosi adatti anche alla realizzazione di strati di usura, per i quali le prestazioni richieste sono molto più elevate. Il RAP può essere introdotto all'interno del conglomerato caldo senza alcuna prescrizione, fino ad un massimo del 10% per lo strato di usura, e del 20% per strati di collegamento e di base: in caso contrario si effettuerà un'analisi granulometrica sugli aggregati, una valutazione della percentuale di legante invecchiato presente, nonché della sua natura, affinché la miscela finale venga progettata in maniera corretta.

10.2 - Riciclaggio a freddo in situ

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a T ambiente.

Il RAP, ottenuto dalla fresatura della vecchia pavimentazione, viene miscelato con emulsioni bituminose o bitume schiumato, agenti rigeneranti ed eventualmente con inerti vergini, per l'eventuale correzione della curva granulometrica; questi due tipi di legante lavorano in modo diverso, e, pur presentando tempi di maturazione differenti, raggiungono tuttavia risultati molto simili.



Figura 5 - Impianto per la produzione di conglomerato a freddo

Il riciclaggio a freddo in impianto fisso, può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri; possono anche essere utilizzati impianti per la produzione di misto cementato opportunamente modificati.

Nel corso degli anni le riciclatrici si sono evolute; si è passati dalle frese modificate e dalle stabilizzatrici alle attuali riciclatrici specializzate. Essendo progettate per il riciclaggio di uno spesso strato di pavimentazione mediante un'unica passata, le moderne riciclatrici sono macchine di grosse dimensioni ad elevate prestazioni che possono essere montate su cingoli o su pneumatici.

Il "cuore" di queste macchine è costituito da un tamburo di fresatura/miscelatura munito di un elevato numero di utensili da taglio che, mentre ruota, fresa il materiale della pavimentazione stradale preesistente.

Durante il processo di fresatura, l'acqua, contenuta in una cisterna collegata alla riciclatrice, è dosata con precisione tramite un impianto d'iniezione gestito da un microprocessore, spruzzata all'interno della camera di fresatura e accuratamente miscelata con il materiale fresato per ottenere il contenuto d'umidità ottimo per effettuare il costipamento.

Le sostanze stabilizzanti fluide, quali l'impasto liquido (o "slurry") di cemento/acqua o l'emulsione bituminosa, singolarmente o abbinati, possono anch'essi essere introdotti direttamente nella camera di miscelatura in modo analogo. Inoltre, il bitume espanso può essere

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

iniettato nella camera di miscelatura mediante una separata barra spruzzatrice.

I treni di riciclaggio possono avere configurazioni diverse in funzione dell'applicazione e del tipo di stabilizzante impiegato. In tutti i casi, la riciclatrice funge da locomotiva e spinge o tira l'attrezzatura a lei collegata mediante barre di spinta o di traino.

Il treno rappresentato è normalmente usato quando si esegue il riciclaggio a freddo con cemento ed emulsione: il cemento e l'acqua vengono miscelati insieme in precise quantità prestabilite, e la boiaccia così ottenuta viene trasferita mediante un tubo flessibile e iniettata contemporaneamente all'emulsione nella camera di miscelatura della riciclatrice.

Una volta riciclato, il materiale è soggetto ad una prima passata di un rullo vibrante che lo consolida. Di seguito è profilato da una motolivellatrice prima di essere costipato da un rullo statico o gommato.

Nei casi in cui è necessario riciclare l'asfalto e parte del pietrisco sottostante per aumentare lo spessore del manto bitumato complessivo è conveniente, vista la necessità di apportare una maggiore percentuale di legante, sostituire l'emulsione bituminosa con bitume espanso.

Vantaggi del Riciclaggio a Freddo

Il riciclaggio a freddo offre numerosi vantaggi, alcuni dei quali sono immediatamente evidenti mentre altri risultano essere meno tangibili:

Vantaggi Ambientali. Per mezzo di questo processo, viene utilizzato tutto il materiale della pavimentazione preesistente. Non occorre quindi trovare apposite aree di smaltimento, e il volume di riporto di materiale "vergine" è ridotto al minimo. Si limitano così le deturpazioni all'ambiente inevitabilmente causate dall'apertura di nuove cave. Anche l'entità delle operazioni di trasporto è inferiore rispetto agli altri processi. Il consumo globale di energia viene pertanto ridotto significativamente così come l'effetto nocivo sulla rete viaria dovuto alla presenza di mezzi di trasporto.

Qualità dello strato riciclato. Viene garantita una miscelatura di elevata e costante qualità dei materiali in sito con acqua e stabilizzanti. L'addizione di fluidi viene eseguita con precisione grazie agli impianti di iniezione gestiti da un microprocessore. E' assicurata una miscelatura di ottima qualità grazie alla scrupolosità con cui i vari componenti vengono miscelati insieme all'interno dell'apposita camera.

Integrità strutturale. Il riciclaggio a freddo genera strati spessi, legati e omogenei che non contengono interfacce deboli tra gli strati più sottili della pavimentazione, come avviene talvolta nel caso di pavimentazioni costruite con metodi tradizionali.

Il sottofondo non viene intaccato. Il riciclaggio a freddo è un'operazione a singola passata, vale a dire i pneumatici ad elevata flottazione passano una sola volta sul sottofondo scoperto che viene interessato in modo marginale. In caso di risanamento delle pavimentazioni mediante attrezzature di costruzione tradizionali il sottofondo è soggetto a carichi ripetuti ad elevata sollecitazione che creano una sorta di appesantimento e determinano la necessità di sterri e riporti.

Tempi più brevi di costruzione. Le moderne riciclatrici offrono elevati ritmi di produzione che riducono, se paragonati agli altri metodi di risanamento, in maniera significativa i tempi di costruzione e i disagi provocati agli utenti della strada.

Sicurezza dei traffici. Uno dei vantaggi più importanti è l'elevato grado di sicurezza del transito garantito da questo processo. Il treno di riciclaggio completo può essere infatti collocato in una sola corsia di scorrimento. Nel caso di strade a doppia corsia, il riciclaggio può essere quindi eseguito in una metà della larghezza della strada durante il giorno e l'intera larghezza della strada, inclusa la corsia riciclata finita, può essere riaperta al traffico all'imbrunire.

Categorie del Riciclaggio a Freddo

Il riciclaggio a freddo può essere diviso, per ragioni pratiche, in tre diverse categorie: riciclaggio in profondità, riciclaggio superficiale e il miglioramento di strade inghiaiate non asfaltate. In molti casi, non esiste una netta distinzione tra i primi due tipi di riciclaggio ed è quindi abbastanza usuale che i due approcci abbiano molti punti in comune.

10.3 - Riciclaggio in Profondità

Il riciclaggio in profondità è idoneo al consolidamento di pavimentazioni preesistenti deteriorate aventi strati di asfalto sia spessi che sottili. La Figura illustra due esempi di riciclaggio in profondità.

In entrambi i casi, la profondità del riciclaggio è pari a 300 mm; mentre l'esempio a sinistra presenta uno strato di asfalto di elevato spessore, lo strato raffigurato nell'esempio di destra, invece, è relativamente sottile.

Una volta terminato il riciclaggio, è necessario stendere un nuovo manto. In caso di strade a traffico leggero, questo manto può essere costituito da uno slurry seal o un trattamento superficiale con emulsione e granigli oppure da un sottile strato di asfalto a caldo. Laddove, invece, la pavimentazione è soggetta a traffico intenso, potrebbe essere necessario realizzare sia la base sia il manto in asfalto.

10.4 - Riciclaggio Superficiale

Normalmente si ricorre al riciclaggio superficiale per eliminare gravi fenditure degli strati di asfalto e al contempo per migliorare la transitabilità dei piani viabili. Questo tipo di riciclaggio, può essere utilizzato in quei casi in cui la sottofondazione è solida, eccezion fatta per alcuni punti deboli degli strati superiori di asfalto. Il riciclaggio superficiale viene svolto a profondità variabili da 80 mm a 150 mm.

10.5 - Miglioramento delle Strade non Asfaltate

E' possibile migliorare le strade inghiaiate non asfaltate, mediante bitumatura, riciclando la ghiaia preesistente addizionata di emulsione bituminosa o di bitume espanso e applicando un manto sottile, come l'impermeabilizzazione con emulsione modificata e graniglia o lo "slurry seal". Gli ovvi vantaggi derivanti da questo tipo di intervento consistono in piani viabili privi di polvere con tempo asciutto e piani stradali più sicuri e stabili in caso di tempo piovoso. E' inoltre assicurato un impiego più utile delle risorse di materiale in quanto la ghiaia non deve essere sostituita ad intervalli regolari; le strade non asfaltate perdono solitamente 20-30 mm di ghiaia all'anno in seguito all'azione del traffico e agli effetti delle condizioni atmosferiche. In questo modo non verranno più causati quei danni ambientali dovuti all'effettiva necessità di aprire cave di prestito di ghiaia. Questo tipo di

riciclaggio viene normalmente effettuato fino a profondità variabili da 100 mm a 150 mm. Va notato che si possono riciclare le strade inghiaiate prive di rivestimento utilizzando il cemento e/o la calce; in tal caso, però, lo strato riciclato deve avere uno spessore maggiore, pari a 200 mm, e quindi tale processo rientra nell'ambito dei riciclaggio in profondità.

10.6 - Sostanze stabilizzanti

Oggi, le sostanze stabilizzanti sono usate in tutto il mondo per ovviare ai limiti che tipicamente derivano dall'impasto dei materiali naturali e che vanno ad influire sulle prestazioni della pavimentazione. Le sostanze stabilizzanti, non solo migliorano le caratteristiche di resistenza di un materiale, ma ne aumentano anche la durata e la resistenza all'azione dell'acqua.

In molte parti del mondo, è praticamente impossibile reperire materiali da costruzione di buona qualità per la realizzazioni di pavimentazioni stradali. I costi di trasporto per l'importazione di un materiale adeguato hanno favorito lo sviluppo di tecniche di stabilizzazione che permettono di utilizzare risorse disponibili in loco. La resistenza necessaria può spesso essere ottenuta applicando tecniche che prevedono l'utilizzo di un materiale di importanza secondari, disponibile sul posto, a cui vengono addizionate piccole quantità di sostanze stabilizzanti aventi un costo relativamente basso. Queste tecniche sono applicabili sia ai processi di riciclaggio sia in caso di realizzazione di nuove opere stradali. Aggiungendo una sostanza stabilizzante, il materiale recuperato da una pavimentazione preesistente può essere rinnovato, evitando così di dover importare materiale nuovo per dare alla struttura della pavimentazione rigenerata la resistenza desiderata.

10.6.1 - tipi di sostanze stabilizzanti

Le sostanze stabilizzanti attualmente utilizzate in tutto il mondo sono innumerevoli. La gamma comprende i composti chimici quali il cloruro di calcio, i polimeri a lunga catena e i prodotti sulfanati di petrolio, altri prodotti brevettati e le sostanze più comuni come il cemento. Tutte queste sostanze mirano a raggiungere lo stesso obiettivo: legare insieme le singole particelle per aumentare la resistenza della superficie e/o renderla maggiormente resistente all'acqua. Alcune sostanze sono più efficaci di altre se impiegate con determinati materiali, altre ancora sono

economicamente più convenienti; tutte però conservano il loro spazio sul mercato e molte di esse vengono utilizzate al meglio tramite l'impiego delle moderne riciclatrici.

Oggigiorno vengono continuamente messi a punto nuovi prodotti ed è importante per il settore che questi vengano, giustamente, messi alla prova.

Le decisioni per stabilire la soluzione da adottare sono generalmente influenzate dai seguenti fattori:

Prezzo. Il costo unitario della stabilizzazione resta comunque il fattore principale;

Reperibilità. Certe sostanze stabilizzanti potrebbero non essere disponibili ovunque;

Caratteristiche del materiale. Alcune sostanze stabilizzanti sono più efficaci di altre, se utilizzate con determinati materiali. Ad esempio la calce dovrebbe essere utilizzata al posto del cemento, nel caso in cui si debbano stabilizzare terreni caratterizzati da un indice di plasticità particolarmente elevato;

Politica. Le politiche estremamente rigorose di alcuni proprietari di strade, in riferimento all'uso di certe sostanze stabilizzanti, sono spesso influenzate da precedenti esperienze;

10.7 - Sostanze stabilizzanti cementizie

La calce, il cemento e i composti ottenuti miscelando questi prodotti con cenere volante, scorie rocciose d'altoforno ed altre sostanze simili, rappresentano le sostanze cementizie stabilizzanti maggiormente utilizzate. Senza considerare la calce, già utilizzata dagli antichi Romani per i loro esperimenti, la sostanza che viene utilizzata da più lungo tempo è il cemento; per quanto ci è dato sapere, è stato usato per la prima volta negli Stati Uniti, nel 1917, come sostanza stabilizzante convenzionale.

La funzione principale è quella di aumentare la resistenza. Inoltre, la calce rilasciata durante il processo di idratazione, reagendo con le particelle di argilla presenti in un terreno plastico, ne riduce la plasticità. L'uso di miscele di cemento deve però essere limitato al trattamento di materiali con Indice di Plasticità inferiore a 10. La calce resta la migliore sostanza stabilizzante per la maggior parte delle materie plastiche.

La resistenza acquisita è principalmente determinata dalla quantità di sostanza stabilizzante aggiunta, ma allo stesso tempo varia in base al tipo di materiale trattato. Contrariamente a quanti alcuni ritengono,

L'aggiunta di una quantità superiore di sostanza stabilizzante allo scopo di ottenere una maggiore resistenza, può ridurre le prestazioni dello strato. Il materiale trattato con una sostanza stabilizzante cementizia tende ad essere mediamente friabile. Aumentare la resistenza del materiale significa renderlo ancora più friabile e perciò lo strato stabilizzato sarà caratterizzato da una diminuzione delle proprie caratteristiche da fatica; in tale situazione, le continue sollecitazioni dovute al carico esercitato dagli automezzi comportano inevitabilmente un aumento delle incrinature che, per lo strato di una pavimentazione stradale, rappresentano ovviamente una caratteristica negativa. E' quindi fondamentale che i requisiti di efficienza dello strato stabilizzato vengano chiaramente indicati e che venga condotto uno studio adeguato delle miscele su campioni rappresentativi allo scopo di determinare il corretto tasso di applicazione.

10.8 - Sostanze stabilizzanti bituminose

L'uso del bitume come sostanza stabilizzante, impiegato sia sottoforma di emulsione sia come bitume espanso, sta diventando sempre più diffuso, principalmente grazie ai progressi fatti in campo tecnologico. Certi bitumi liquidi sono stati usati con successo per stabilizzare strati sottili.

Quando il materiale viene stabilizzato con il bitume non è soggetto a incrinature da ritiro, tipiche dei materiali trattati con cemento. La superficie realizzata con materiale stabilizzato con bitume può essere immediatamente aperta al traffico, grazie alla legatura iniziale delle particelle in superficie che impediscono lo sfondamento come conseguenza del passaggio del traffico. Se una superficie stabilizzata con bitume è correttamente finita può essere usata subito senza particolari problemi. I mezzi pesanti, compresi i rulli compressori, non devono essere parcheggiati sulla superficie completata per almeno una settimana, periodo durante il quale la superficie aumenta la propria resistenza.

Il trattamento con il bitume è un metodo conveniente per aumentare la resistenza di un materiale e per limitare le conseguenze dell'azione dell'acqua. Lo strato realizzato con materiale legato con bitume è flessibile e presenta caratteristiche di resistenza all'usura superiori alla media se paragonato agli strati trattati con sostanze stabilizzanti cementizie che permettono di ridurre lo spessore dello strato senza sacrificare la capacità strutturale.

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

Esistono due tipi molto diversi di processi di riciclaggio che prevedono l'impiego del bitume:

- Il riciclaggio superficiale che interessa solo l'asfalto. Durante questo tipo di operazione, l'emulsione bituminosa è usata per rigenerare il vecchio strato di bitume sull'asfalto. Si tratta essenzialmente di un procedimento, in situ, di miscelatura a freddo dell'asfalto e non di un processo di stabilizzazione;
- un procedimento di stabilizzazione che prevede l'uso del bitume per stabilizzare il materiale riciclato. Normalmente, questo procedimento può essere applicato nei punti in cui lo spessore dello strato è superiore ai 100 mm.

E' importante capire che il riciclaggio in profondità con una sostanza stabilizzante bituminosa crea un materiale stabilizzato con bitume e non una sostanza simile all'asfalto. Una base di asfalto avrà un contenuto di vuoti pari a circa il 4 %. Contrariamente all'asfalto artificiale, la gradazione ottenuta dal materiale riciclato dipende, in particolar modo, dal tipo di materiale che costituisce la struttura della pavimentazione preesistente. Il materiale stabilizzato con bitume ha, di solito, un contenuto di vuoti compreso tra il 10 e il 20% e tende a comportarsi in parte come un materiale granulare, in grado di sopportare la sollecitazione di rottura a compressione dovuta alla frizione intergranulare, e in parte come un materiale viscoelastico che può sopportare sforzi di tensione ripetuti. Si tratta quindi di un ibrido.

10.9 - Processo di stabilizzazione con emulsione bituminosa

Le emulsioni bituminose sono state originariamente sviluppate per superare le difficoltà tipiche delle lavorazioni che prevedono l'impiego di bitume a caldo e, per realizzare a temperatura ambiente miscele con materiale umido.

Un'emulsione è composta da due liquidi immiscibili, uno disperso nell'altro sotto forma di goccioline o di piccoli globuli. Le più comuni emulsioni bituminose sono formate da goccioline di bitume disperse in fase acquosa continua, nella quale le particelle di bitume non possono raggrupparsi a causa della presenza di una sostanza attiva in superficie (un emulsionante) che forma una pellicola protettiva intorno alle particelle. La maggior parte delle emulsioni usate come sostanze stabilizzanti hanno una componente di "residuo di bitume" del 60%; ciò significa che il 60% del volume dell'emulsione è composto da bitume disperso nel 40% del volume di acqua.

Dopo aver realizzato la miscela con il materiale, l'acqua viene eliminata e le particelle di bitume si accorpano, formando una pellicola ininterrotta che si deposita sulla superficie dell'aggregato. Si dice comunemente che l'aggregato "rompe"; questo fenomeno è provocato da:

- perdita di acqua attraverso l'evaporazione o l'assorbimento da parte del materiale che viene miscelato;
- coagulazione chimica dovuta ad un processo di reazione tra l'emulsione e l'aggregato;
- disturbi meccanici provocati da eccessive pressioni di pompaggio, processi di miscelatura e sforzo di costipamento;
- composizione chimica dell'emulsione;

Normalmente il cemento viene utilizzato assieme all'emulsione bituminosa. Oltre ad aumentare la capacità di mantenimento della resistenza, il cemento agisce come una specie di catalizzatore, aumentando le originali caratteristiche di resistenza. Una ricerca condotta per studiare gli effetti della miscelatura del cemento ad una emulsione bituminosa ha dimostrato che si può aggiungere una quantità di cemento pari al 2% per massa senza che vengano ridotte significativamente le caratteristiche da fatica dello strato stabilizzato.

Esistono due tipi di emulsioni bituminose, quelle anioniche e quelle cationiche. La differenza fondamentale tra loro è il carico sugli ioni di bitume sospeso e la "fase" di sospensione. Le particelle di bitume in un'emulsione anionica hanno una carica negativa in una fase alcalina, mentre le emulsioni cationiche hanno delle particelle di bitume con carica positiva in fase acida. Prodotti chimici detti stabilizzanti vengono aggiunti in entrambi i tipi di emulsione, per prolungare il tempo di rottura, riducendo in maniera considerevole l'entità della carica sulle particelle di bitume verso l'aggregato.

Un'emulsione anionica si rompe solo quando l'acqua che contiene il bitume in sospensione evapora o viene assorbita dall'aggregato o dal cemento. Le emulsioni cationiche si rompono invece chimicamente; ciò implica che vengono aggiunti, durante il processo di produzione, particolari prodotti chimici i quali provocheranno la separazione del bitume dall'acqua dopo un determinato periodo di tempo.

L'unica ragione per cui si utilizza il bitume emulsionante come sostanza stabilizzante è che esso permette di miscelare il bitume con materiali freddi e umidi.

10.10 - Processo di stabilizzazione con bitume espanso

L'espansione si forma quando piccole particelle di acqua vengono a contatto con il bitume a caldo; la superficie complessiva aumenta e la viscosità del bitume viene sensibilmente ridotta. Il bitume diventa allora particolarmente adatto per essere miscelato con un aggregato freddo e umido.

Il bitume espanso può essere utilizzato come sostanza stabilizzante con molti materiali; dal pietrisco di buona qualità alla ghiaia più scadente con una plasticità relativamente alta. I principali vantaggi della stabilizzazione ottenuta con il bitume espanso, piuttosto che con l'emulsione bituminosa, sono i seguenti:

- riduzione dei costi sostenuti per il legante e il suo trasporto; questo perché non bisogna sostenere alcun costo di produzione;
- subito dopo aver ultimato la miscela utilizzando il bitume espanso, il materiale ottenuto può essere posto in opera e costipato;
- il materiale trattato con bitume espanso rimane lavorabile per lunghi periodi;

I principali fattori che determinano l'impiego del bitume espanso come sostanza stabilizzante sono:

• **Caratteristiche di espansione.** Le caratteristiche del bitume espanso sono il rapporto di espansione e il tempo di semitrasformazione. Il rapporto di espansione è il rapporto tra il volume massimo del bitume allo stato espanso e allo stato non espanso. Il tempo di semitrasformazione corrisponde al tempo, misurato in minuti secondi, che la schiuma impiega a depositarsi fino a raggiungere metà del volume massimo ottenuto. Le caratteristiche di espansione più importanti sono: la temperatura del bitume, la quantità d'acqua addizionata al bitume, la pressione di iniezione del bitume nella camera di espansione, la presenza di sostanze antischiuma come i composti di silicio. Generalmente la schiuma migliore è quella che riesce ad ottimizzare sia l'espansione che il tempo di semitrasformazione

• **Indice di bitume e reologia.** I bitumi più morbidi presentano generalmente delle caratteristiche schiumogene migliori. I bitumi più

duri vengono utilizzati preferibilmente in condizioni climatiche caratterizzate da temperature elevate.

- **Dispersione del bitume.** Contrariamente all'asfalto caldo, il materiale stabilizzato con il bitume espanso non è di colore nero. Questo succede perché le particelle più grosse di aggregato non sono ricoperte e sono solitamente prive di bitume.

10.11– Le materie prime riciclate per la realizzazione di sottofondi stradali ed emulsioni bituminose

Da molti anni la ricerca affronta il tema dell'utilizzo dei materiali di riciclo nelle costruzioni stradali; pertanto gli studi sono sempre più orientati alla caratterizzazione chimico-fisica del prodotto, alla valutazione delle caratteristiche meccaniche delle miscele, alla verifica delle prestazioni in opera ed al potenziale inquinamento connesso all'impiego del prodotto.

I materiali di scarto utilizzabili come materie prime secondarie nella costruzione di pavimentazioni stradali, possono aver origine da molteplici processi produttivi. La loro produzione è delegata ad operatori economici che provvedono alla raccolta, alla selezione, alla lavorazione ed alla distribuzione del prodotto; l'attuale frammentazione del mercato non consente però lo stoccaggio di quantità significative: da ciò ne deriva una carenza di materiale per soddisfare la realizzazione del fabbisogno relativo alle infrastrutture, dettata probabilmente anche dalla sfiducia che ancora oggi si ha nell'utilizzare questa tipologia di materie prime, nelle cui potenzialità forse non si crede abbastanza.

Le principali tipologie di materie prime secondarie utilizzate per pavimentazioni stradali, sono costituite da:

- ateriale proveniente da C&D; m
- ateriale proveniente da terre e rocce da scavo; m
- ateriale in sito. m

Di seguito verrà affrontato esclusivamente il problema del riutilizzo di materiali provenienti da C&D, al fine di verificarne lo stato, la normativa e le caratteristiche richieste.

L'analisi che si intende svolgere, infatti, si basa sulla possibilità di riutilizzo di materiali provenienti dalla demolizioni di manufatti che sono stati oggetto di incendi.

10.11.1 Materiale proveniente da C&D

In questi ultimi anni la crescente attenzione alle problematiche ambientali ha reso sempre più difficoltoso il prelievo da cave naturali degli inerti e, nel contempo, sempre più restrittiva la regolamentazione per la gestione delle discariche di rifiuti: di questi solo una minima parte viene riutilizzata come materia prima secondaria.

Una delle categorie di maggior interesse in ambito stradale, è quella dei rifiuti relativi ai ***materiali da costruzione e demolizione***.

Questi materiali, altrimenti detti ***inerti da C&D***, comprendono tutti gli scarti che derivano dalle diverse attività di costruzione, manutenzione, ristrutturazione, demolizione di edifici, opere civili ed infrastrutture di trasporto; un notevole contributo a questa tipologia di inerti, proviene anche dalla fabbricazione e prefabbricazione di elementi e componenti delle costruzioni civili (mattoni, piastrelle, elementi strutturali in cemento armato, ecc.).

I rifiuti provenienti da costruzioni e demolizioni, rappresentano una parte significativa del totale dei materiali da avviare annualmente a discarica: questo tipo di smaltimento richiede un numero sempre maggiore di siti in cui realizzare gli impianti, e comporta, anche a causa della difficile dislocazione di questi ultimi, spesso molto lontane dalle aree urbane, notevoli costi di trasporto, gestione e smaltimento.

Una tecnologia che miri ad un contenimento nei consumi delle materie prime vergini, e ad una limitazione degli ingenti quantitativi di rifiuti, non può prescindere dalla scelta del riciclaggio; essa rappresenta una tecnologia ancora giovane nel settore delle costruzioni, e spesso non risulta competitiva, soprattutto dal punto di vista economico, rispetto a tecnologie consolidate nel tempo e che si avvalgono di materie prime vergini.

Seppur questa fase iniziale sia tipica di qualsiasi processo innovativo che si rispetti, due problematiche in particolare ne rendono necessario il superamento:

- a carenza sempre più sentita di materie prime vergini;
- a sovrabbondanza di macerie, associata alla difficoltà di smaltimento delle stesse.

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

L'analisi dei flussi degli inerti da costruzione e demolizione è molto complessa perché questo tipo di rifiuto viene prodotto da settori diversi, e segue strade a loro volta difficilmente quantificabili, a causa del fatto che non tutti siano monitorati a livello nazionale e spesso vengano contabilizzati in maniera scorretta.

In particolare la produzione dei rifiuti da C&D può derivare da almeno quattro settori:

1. attività di costruzione e demolizione;
2. attività di costruzione e demolizione abusiva;
3. attività di “microristrutturazioni” domestiche svolte in conto proprio;
4. altre attività (es: scarifica stradale,...).

La loro composizione risulta molto variabile, sia per la diversa origine dei rifiuti, sia per molteplici fattori quali le tipologie e le tecniche costruttive locali, il clima, l'attività economica e lo sviluppo tecnologico della zona, nonché le materie prime e i materiali da costruzione localmente disponibili.

A livello semplicemente esplicativo, si riportano in tabella le composizioni percentuali medie del rifiuto di demolizione in Italia.

L'esatta composizione merceologica dei rifiuti di demolizione è un dato fondamentale per la corretta progettazione delle diverse fasi di trattamento. È importante sottolineare che la presenza di impurezze nel materiale in ingresso agli impianti di recupero (gesso, asfalto, legno, gomma, plastica, etc.) ne limita le possibilità d'impiego dopo il trattamento e/o condiziona la scelta della tecnologia di riciclaggio da adottare.

Possono inoltre essere presenti anche alcuni elementi pericolosi, quali amianto, cromo, cadmio, zinco, piombo, mercurio e PCB, contenuti in alcuni materiali da costruzione o derivanti da demolizioni di siti contaminati, ma tali sostanze si trovano in percentuali abbastanza ridotte.

Inoltre, la rimozione dei materiali pericolosi è di fondamentale importanza per poter ottenere, dal processo di demolizione, materiali non contaminati che possano essere facilmente avviati al riciclo. Alcune sostanze rilasciate durante la demolizione possono infatti inquinare non solo gli altri rifiuti da C&D, ma anche penetrare nell'atmosfera o nel terreno, oltre ad esporre a notevoli rischi gli operatori del settore. In un processo di demolizione corretto, quindi, i materiali potenzialmente

pericolosi devono essere rimossi per primi, per due motivi fondamentali:

- 1) fin tanto che i materiali sono riconoscibili e possono essere rimossi manualmente, i rischi per gli addetti ai lavori saranno minori;
- 2) la rimozione dei materiali contenenti sostanze pericolose permette di avere rifiuti C&D non contaminati da sostanze nocive, quindi riciclabili con maggiore facilità e riconducibili alla tipologia dei rifiuti non pericolosi, con i vantaggi normativi che ciò comporta.

I materiali ed i prodotti utilizzati in edilizia possono emettere, ad esempio, composti altamente tossici (cancerogeni o allergenici), composti irritanti o composti con sconosciuti effetti collaterali: inoltre possono rilasciare i seguenti inquinanti:

- inquinanti di natura fisica: radon e prodotti di decadimento;
- composti organici volatili e semivolatili, in particolare formaldeide, solventi organici aromatici e antiparassitari;
- inquinanti biologici: funghi, muffe, batteri;
- fibre minerali naturali e artificiali: amianto, lana di vetro, lana di roccia.

Tra i componenti pericolosi, quelli che sono caratterizzati da un impatto ambientale e sanitario elevato, e sono presenti in quantità più rilevanti negli edifici da demolire, sono indubbiamente l'amianto e il piombo.

Impianti per il riciclaggio dei rifiuti derivanti da C&D

I rifiuti derivanti da costruzioni e demolizioni, di edifici come di strade, per essere riutilizzati sono trattati presso appositi impianti di frantumazione, che possono essere di due tipi:

- gruppi mobili di frantumazione;
- impianti fissi di trattamento e riciclaggio.

L'impiego dei gruppi mobili è giustificato dal costo iniziale inferiore, rispetto a quello degli impianti fissi, oltre che dalla possibilità di ridurre

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

sensibilmente il costo di trasporto, specialmente nei casi in cui è possibile frantumare grosse quantità di materiale da utilizzare in loco. Questi impianti sono dotati di dispositivi magnetici per l'allontanamento dei materiali ferrosi, ma non consentono di separare automaticamente altri materiali estranei, come plastica, legno o carta.



Figura 6 - Esempio di separazione magnetica

La frantumazione primaria delle macerie avviene tramite frantoio a mascelle o ad urto; quella secondaria, se prevista, è seguita da una fase di vibrovagliatura, per la produzione di aggregati di materiale inerte secondario o vergine, sempre che le macerie da riciclare siano costituite da materiale litico proveniente da scavi.

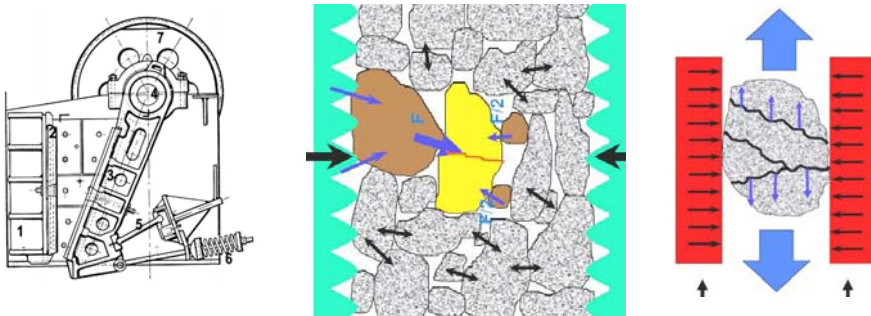


Figura 7 - Frantoio a mascelle

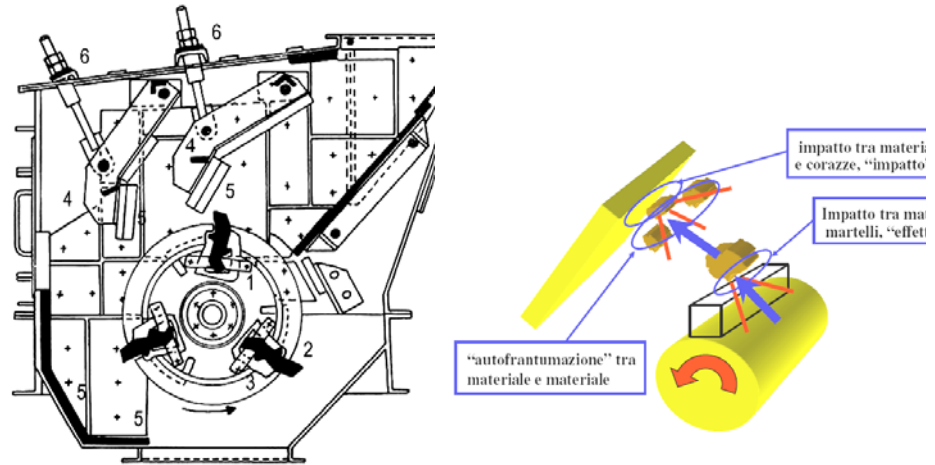


Figura 8 - Frantoio a urto

Questi impianti, seppure generalmente realizzati in serie e quindi senza tener conto di esigenze o particolarità specifiche, sono in grado di trattare anche piccole quantità sul posto di produzione portando ad un risparmio sui costi di trasporto delle macerie, come prima accennato, anche se dal punto di vista qualitativo, se il materiale in ingresso non è molto omogeneo, non è possibile raggiungere buoni rendimenti di selezione, ma soltanto una riduzione granulometrica.

Gli impianti fissi, invece, presentano una tecnologia più completa, consentono cioè la produzione di materiali selezionati non solo da un punto di vista qualitativo, ma anche in relazione all'assortimento granulometrico che ne deriva, garantendo d'altra parte una produzione molto elevata.

Questi impianti, rispetto ai precedenti, sono in grado di fornire un prodotto di migliore qualità anche per il fatto di essere progettati e realizzati per un sito specifico e per una determinata quantità e qualità di rifiuti di demolizione, oltre che per la possibilità di impiegare tecnologie più innovative.

Per entrambe i tipi di impianto, il processo di riciclaggio adottato può sintetizzarsi nelle seguenti fasi:

- controllo sulla qualità dei materiali in arrivo;

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

- stoccaggio provvisorio dei rifiuti, in modo da mantenere separati i materiali di diverso tipo, come ad esempio: s
- alcestruzzi e c.a, c
- materiali lapidei riutilizzabili provenienti da scavi, m
- laterizi, tegole, mattoni e rivestimenti in genere, l
- conglomerati bituminosi, c
- materiale leggero (carta, cartone, legno e plastica); m
- selezione dei rifiuti per mezzo di pale gommate; p
- revagliatura per la separazione di terra, terreno e gesso; p
- frantumazione primaria, tramite frantoio a mascelle o ad urto, con allontanamento del materiale trattenuto per mezzo di nastro trasportatore; f
- separazione magnetica o manuale di ferro; s
- frantumazione secondaria, se prevista, tramite frantoio a mascelle, a cono o ad urto; f
- lavaggio; v
- stoccaggio dei prodotti del riciclaggio (materie prime secondarie). s

10.12 - Qualità delle materie prime secondarie

La qualità del materiale prodotto, dopo un trattamento di riciclaggio, dipende principalmente dallo stoccaggio provvisorio dei rifiuti, effettuato nella loro fase d'arrivo all'impianto, e dalla buona omogeneità e costanza di produzione del materiale.

Nella fase di stoccaggio, infatti, è necessario eseguire una selezione all'origine per separare le diverse componenti dei rifiuti ed allontanare le sostanze estranee o inquinanti.

La composizione costante del prodotto si può conseguire grazie all'adozione di procedure d'estrazione dai cumuli di macerie, che consentono di ottenere una sufficiente miscelazione delle varie tipologie di rifiuti avviati al trattamento; dalla composizione costante e dall'analisi granulometrica, derivano caratteristiche prestazionali immutabili: proprio per questo è bene effettuare dei controlli frequenti, dai quali scaturiscono valutazioni preliminari sui possibili campi d'impiego.

Nella fase di alimentazione dell'impianto di riciclaggio, per mezzo di pala gommata, l'operatore sceglie con cura il materiale da introdurre nella tramoggia, al fine di avere un carico in cui siano presenti tutti i diversi componenti.

Il materiale viene allontanato, dopo la vagliatura primaria, per mezzo di nastro separatore, e stoccato nell'attesa di un'ulteriore riciclaggio, eseguito con un frantoio ad urto, ed un vibrovaglio a tre piani, che consente di produrre diverse selezioni granulometriche.

I controlli di qualità a cui sono sottoposti questi prodotti, sono diversi sia per frequenza sia per tipologie di prove; ad esempio per le pezzature più grossolane, sono previste prove settimanali, come analisi granulometrica, determinazione dei limiti di consistenza, prova di costipamento di una terra (Proctor), prova CBR, mentre man mano che la granulometria si fa più fine, si effettuano prove come la L.A., coefficiente di forma, equivalente in sabbia, e anche la loro frequenza è inferiore.

Riutilizzo delle materie prime secondarie

La scelta di messa in discarica dei materiali, caratterizzata da elevati costi economici nonché ambientali, viene oggi spesso scartata a vantaggio di tecniche di recupero, ad esempio in una nuova pavimentazione.

Le materie prime secondarie ottenute dal processo di riciclaggio, possono essere utilizzate per una serie di applicazioni; le caratteristiche richieste a questi materiali, in assenza di una normativa specifica, sono le stesse dei materiali vergini per le medesime applicazioni; proprio per questo motivo ogni materiale è accompagnato da test di qualificazione, a dimostrazione del fatto che l'utilizzo di detti materiali riciclati, non comporta un abbassamento della qualità del prodotto finale.

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

In Italia questa tipologia di riciclaggio tarda a spiccare il volo, e l'utilizzo che ne viene fatto è soprattutto relativo a sottofondi per piazzali, strade interne e pavimentazioni di opifici industriali, strade di scarsa importanza, e al riempimento di scavi eseguiti per la posa in opera di elettrodotti, gasdotti, acquedotti e reti fognanti.

Negli ultimi anni si è iniziata ad affermare una certa tendenza rivolta alla selezione delle macerie, al fine di ottenere tre categorie qualitativamente differenti:

- m
ateriali con caratteristiche identiche a quelle dei materiali originari;
- m
ateriali con caratteristiche di nuovi materiali che possono sostituire quelli tradizionali nelle stesse utilizzazioni da cui provengono;
- m
ateriali con caratteristiche di nuovi materiali, che possono subentrare a quelli tradizionali, in impieghi diversi da quelli da cui provengono.

Nella prima categoria rientrano ad esempio i materiali ferrosi e quelli metallici in genere, impiegati nella produzione di nuovi semilavorati.

Nella seconda categoria rientrano le macerie costituite da calcestruzzo, calcestruzzo armato e conglomerati bituminosi; spesso sono parte integrante del materiale vergine, dopo essere stati preventivamente frantumati, vagliati ed eventualmente ritrattati, come nel caso del conglomerato bituminoso.

Nella terza categoria rientrano invece gran parte delle macerie edilizie, in particolar modo laterizi, tegole, mattoni, materiali plastici (in prevalenza PVC), legno e vetro.

Il materiale da riciclare viene separato, frantumato e opportunamente vagliato, per essere successivamente integrato alla graniglia dei conglomerati bituminosi per uso stradale, come strato anticapillare e come sottofondo per strade con bassi livelli di traffico, ed infine come aggregati per produrre conglomerati cementizi leggeri e a bassa resistenza.

I materiali plastici dopo il riciclo trovano impiego nella produzione dei casseri, sagome per solai e additivi per calcestruzzi leggeri. Il PVC, grazie a recenti tecnologie di riciclaggio, trova impiego nella produzione

di profilati per serramenti, previa aggiunta di materiale vergine in percentuali comprese tra il 30 e il 60%. Il legno, dopo essere stato sminuzzato, può essere impiegato come farina di legno nella lavorazione di materiale plastico, per la produzione di mattoni coibentati ed infine come combustibile.

Il vetro è riciclato per poi produrre prodotti (sempre in vetro) non utilizzabili nel settore delle costruzioni, come bottiglie e contenitori in genere, che possiedono minore trasparenza rispetto a quella prevista per le chiusure in campo edilizio.

Un programma di ricerca in ambito ferroviario, ad esempio, ha effettuato una valutazione, in termini prestazionali, delle caratteristiche fisiche e meccaniche, determinate con prove di laboratorio previste sulle terre, di un misto granulometrico costituito da materiale riciclato, per un eventuale impiego nella costruzione del corpo stradale ferroviario e della relativa piattaforma. Il confronto tra le prescrizioni tecniche ferroviarie e i risultati delle prove in sito, eseguite su un tratto sperimentale, hanno evidenziato ottime possibilità d'impiego del misto granulometrico riciclato.

Un altro settore in cui l'impiego di aggregati riciclati può diventare efficace è quello dei conglomerati cementizi. Le tecnologie attuali non consentono una sostituzione totale dei materiali naturali, ma è disponibile un processo tecnologico capace di produrre aggregati riciclati a partire da materiali con proprietà omogenee. Con l'impiego di materie prime secondarie di qualità, sono necessarie poche variazioni alla tecnologia del calcestruzzo. Ciò non è valido nel caso della sabbia riciclata, che presenta caratteristiche non omogenee e comporta un congruo aumento della quantità d'acqua d'impasto, e pertanto come inerte è utilizzato raramente.

Gli aggregati riciclati da impiegare per la produzione di calcestruzzi, per esempio, provengono solitamente dalla frantumazione e dalla selezione degli stessi, o dal riciclaggio di una miscela di macerie. La qualità dei prodotti dipende dal tipo di materiale di base, considerando però che per i preconfezionatori il maggior interesse è rivolto al riciclaggio del proprio prodotto, anche per dimostrare che il calcestruzzo appartiene ad un sistema di gestione dei rifiuti che prevede il recupero di materiale, per ridurre quanto più possibile lo smaltimento in discarica.

Questa soluzione richiede selezione e controlli in produzione, da cui costi aggiuntivi.

CAPITOLO 10- Tecniche di riciclaggio

Inoltre l'impiego di materie prime secondarie comporta problemi sia di natura tecnica sia economica, quindi l'adeguamento degli impianti di produzione, per quanto riguarda le aree di stoccaggio ed i relativi costi; proprio questi ulteriori costi potrebbero spingere i preconfezionatori a commercializzare calcestruzzi a basse prestazioni, ma anche questi devono rispondere alle prescrizioni di durabilità delle strutture previste dalla norma **UNI 9858** che, salvo per calcestruzzi con classe d'esposizione 1, prevede l'adozione di materiali (calcestruzzi) con buona resistenza meccanica.

Infine si osserva che è in aumento la tendenza all'automazione degli impianti, ma questa scelta ha valenza se gli aggregati hanno caratteristiche costanti, poiché in caso contrario si avrebbero ripercussioni sul rapporto a/c, sulla consistenza e sulla resistenza, e quindi sulla qualità del prodotto finale. Tutto questo rallenta l'uso di materie prime secondarie nel settore dei conglomerati cementizi.

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

L'obiettivo del presente studio e della campagna sperimentale svolta è stato, come già precedentemente spiegato, quello di studiare le proprietà residue del calcestruzzo dopo l'esposizione a temperature che variano tra i 20°C e i 600°C, al fine di individuarne un possibile impiego in una campagna di riutilizzo.

Tali prove sono state condotte su campioni all'uopo confezionati e, pertanto, non hanno potuto tener conto di tutti quei "vizi, che sommandosi a quelli derivanti dal confezionamento, si aggiungono durante la vita del calcestruzzo. Ossia a tutti quelli che sono stati trattati nell'apposito capitolo dedicato alla durabilità.

Di seguito, pertanto, verranno analizzate le variazioni delle proprietà meccaniche dei due tipi di provino, a seguito di Trattamento Termico:

Per far ciò ci riferiremo i provini verranno identificati con la seguente sigla:

la prima lettera , **Cx** o **Px**, indicherà rispettivamente il provino di calcestruzzo realizzato con legante Portland al Calcare CEM II/A-LL o il provino di calcestruzzo con legante Portland alla Pozzolana CEM II/B-P seguito dal numero del provino, mentre le cifre seguenti indicheranno la temperatura massima a cui è stato esposto (es. C1-20, C1-600, P1 – 20, P1-600).

Per una prima analisi condotta visivamente sui campioni sottoposti a trattamento termico, indipendentemente dalla tipologia di calcestruzzo, possono essere utili le indicazioni sulla variazione del colore e del suo aspetto superficiale. Infatti con il variare della temperatura il calcestruzzo assume, per variazioni dei suoi componenti, diverse colorazioni passando dal grigio chiaro tipico colore del calcestruzzo tal quale ($T=20^{\circ}\text{C}$) al rosa ($T=300\div 400^{\circ}\text{C}$), al grigio più scuro ($T=600^{\circ}\text{C}$).

L'analisi è iniziata con una valutazione macroscopica della variazione della colorazione dei provini a seguito di esposizione a temperature

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

diverse e alla comparsa di una maggiore porosità superficiale fino alla presenza di microfessure.

Ed è proseguita con la valutazione delle caratteristiche dei provini analizzate sono le seguenti analisi sperimentali:

1. Calcolo del peso specifico:
2. Calcolo della velocità mediante prova ad ultrasuoni
3. Calcolo dell'indice di rimbalzo
4. Calcolo della resistenza a compressione

11.1 Colorazione assunta dai provini esposti alle diverse temperature

I provini sottoposti alle diverse temperature manifestano colorazioni differenti come riportato nelle immagini e nella tabella riassuntiva.

Infatti con il variare della temperatura il calcestruzzo assume, per variazioni dei suoi componenti, diverse colorazioni passando dal grigio chiaro tipico colore del calcestruzzo tal quale ($T=20^{\circ}\text{C}$) al rosa ($T=300 \div 400^{\circ}\text{C}$), al grigio più scuro ($T=600^{\circ}\text{C}$).

Parallelamente la sua superficie diventa sempre più porosa fino a presentarsi friabile e la presenza di microfessure risulta sempre più diffusa.



CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI



Figura 0-1 - Confronto visivo serie di campioni

Analisi visiva sui campioni di Calcestruzzo alla Pozzolana						
Temperatura	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
Colore	Grigio	Rosa chiaro	Rosa	Rosa	Grigio scuro	Grigio scuro
Aspetto	Compatto	Compatto	Poroso	Poroso	Poroso	Molto poroso
Lesioni	Assenti	Assenti	Microlesioni accidentali	Microlesioni diffuse	Microlesioni diffuse	Macrolesioni diffuse
Analisi visiva sui campioni di Calcestruzzo al Calcare						
Temperatura	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
Colore	Grigio chiaro	Grigio	Rosa	Rosa	Grigio scuro	Grigio scuro
Aspetto	Compatto	Compatto	Poroso	Poroso	Poroso	Molto poroso
Lesioni	Assenti	Assenti	Microlesioni accidentali	Microlesioni accidentali	Microlesioni accidentali	Microlesioni diffuse

Tabella 1 - Valutazione approssimata delle caratteristiche visive

11.2. Calcolo del peso specifico dopo il trattamento termico

Come può evincersi dall'analisi delle tabelle riepilogative e dei grafici sotto riportati le due tipologie di calcestruzzo presentano una variazione di peso specifico pressappoco identica, a meno di piccoli scarti che non superano lo 0,5%.

Dato rilevante è la considerevole perdita di massa che fa pensare ad un decadimento delle prestazioni. Infatti se ragioniamo sui campioni trattati a 600°C che hanno riportato una riduzione di peso specifico all'incirca del 6%, il peso specifico del calcestruzzo assunto pari a 24,0 kN/m³ come da NTC/08 passa a 22,6 kN/m³.

In riferimento al principio di conservazione della massa tale perdita di massa può essere spiegata come evaporazione dell'acqua presente all'interno dei campioni oppure mediante decomposizione chimica dei componenti e quindi espulsione di materia sotto forma di gas.

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Calcolo del peso specifico dopo il trattamento termico					
Sigla cubetto	Peso	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
P1-20	8142	3420150	2,381	23,81	23,99
P2-20	8185	3397500	2,409	24,09	
P3-20	8068	3352500	2,407	24,07	
P4-200	7884	3375000	2,336	23,36	23,38
P5-200	7951	3375000	2,356	23,56	
P6-200	7889	3397500	2,322	23,22	
P7-300	7811	3397500	2,299	22,99	23,02
P8-300	7804	3397500	2,297	22,97	
P9-300	7845	3397500	2,309	23,09	
P10-400	7620	3397500	2,243	22,43	22,50
P11-400	7669	3397500	2,257	22,57	
P12-400	7648	3397500	2,251	22,51	
P13-500	7715	3375000	2,286	22,86	22,70
P14-500	7720	3397500	2,272	22,72	
P15-500	7706	3420150	2,253	22,53	
P16-600	7569	3397500	2,228	22,28	22,4
P17-600	7551	3352500	2,252	22,52	
P18-600	5777*	3397500	/	/	

Tabella 2 - Calcolo del peso specifico Calcestruzzo alla pozzolana

Calcolo del peso specifico dopo il trattamento termico					
Numero cubetto	Peso	Volume	Peso specifico	Peso specifico	Peso specifico medio
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³
C1-20	8031	3374850	2,38	23,8	23,88
C2-20	8048	3352500	2,401	24,01	
C3-20	8047	3375000	2,384	23,84	
C4-200	7889	3352500	2,353	23,53	23,26
C5-200	7971	3420150	2,331	23,31	
C6-200	7790	3397500	2,293	22,93	
C7-300	7769	3352500	2,317	23,17	23,18
C8-300	7792	3375000	2,309	23,09	
C9-300	7861	3375000	2,329	23,29	
C10-400	7775	3375000	2,304	23,04	22,98
C11-400	7817	3397500	2,301	23,01	
C12-400	7775	3397500	2,288	22,88	
C13-500	7647	3420150	2,236	22,36	22,60
C14-500	7705	3397500	2,268	22,68	
C15-500	7786	3420150	2,277	22,77	
C16-600	4974*	3375000	/	/	22,65
C17-600	7738	3375000	2,293	22,93	
C18-600	7649	3420150	2,236	22,36	

Tabella 3 - Calcolo del peso specifico Calcestruzzo al calcare

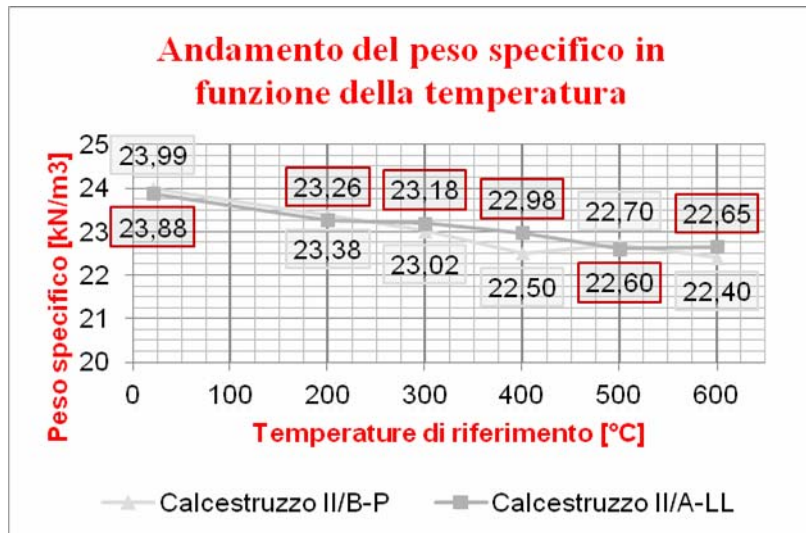


Figura 0-2 - Confronto in termini di peso specifico medio

Fig.

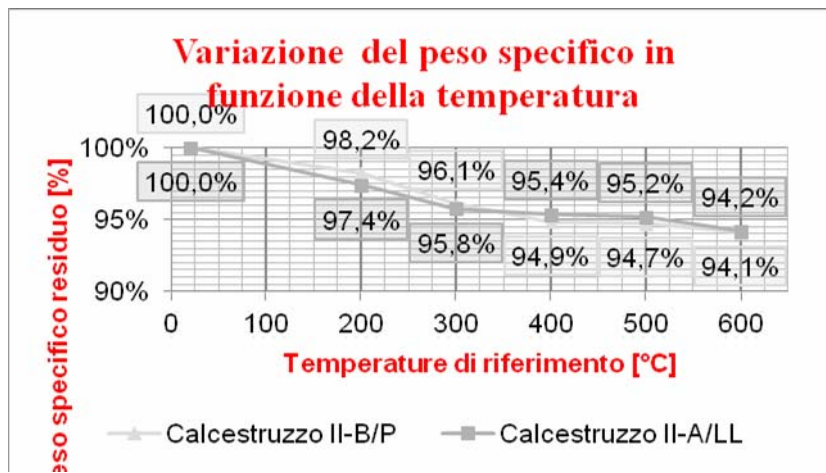


Figura 0-3 - Confronto in termini di peso specifico residuo medio

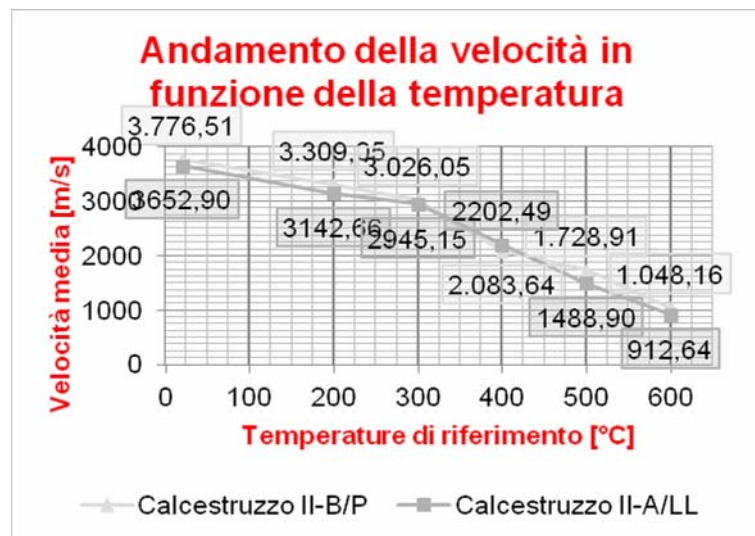
Fig.

11.3. Calcolo della velocità, mediante prova ad ultrasuoni, dopo il trattamento termico

Le prove ad ultrasuoni, in particolar modo quella per trasmissione diretta, forniscono indicazioni sul livello di danneggiamento dell'elemento oggetto di indagine. Essa è applicabile agli elementi di calcestruzzo quando si sia tracciata preventivamente la curva di taratura specifica per il calcestruzzo di riferimento.

L'interesse del metodo risiede nella possibilità di individuare le eterogeneità e le alterazioni che il calcestruzzo può subire nel tempo misurabili con il decremento della velocità di propagazione nel manufatto.

Dal grafico seguente il decadimento è rilevante in quanto a 600°C si presenta una velocità circa un quarto rispetto alla velocità iniziale, questo lascia intendere un notevole quadro fessurativo interno.



CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Calcolo della velocità mediante prova ad ultrasuoni						
Sigla cubetto	Peso	Dimensioni			Velocità	Velocità media
/	g	mm	mm	mm	m/s	m/s
P1-20	8142	150	151	151	3826,53	3776,51
P2-20	8185	150	151	150	3676,47	
P3-20	8068	149	150	150	3826,53	
P4-200	7884	150	150	150	3289,46	3309,05
P5-200	7951	150	150	150	3289,47	
P6-200	7889	150	151	150	3348,21	
P7-300	7811	150	151	150	3024,19	3026,05
P8-300	7804	150	151	150	2976,19	
P9-300	7845	150	150	151	3077,76	
P10-400	7620	150	151	150	1953,13	2083,64
P11-400	7669	150	150	151	1893,94	
P12-400	7648	150	151	150	2403,85	
P13-500	7715	150	150	150	1659,29	1728,91
P14-500	7720	151	150	150	1838,24	
P15-500	7706	151	151	150	1689,19	
P16-600	7569	151	150	150	1109,47	1048,16
P17-600	7551	150	150	149	986,84	
P18-600	5777*	150	151	150	/	

Tabella 4 - Calcolo della velocità Calcestruzzo alla pozzolana

Calcolo della velocità mediante prova ad ultrasuoni						
Sigla cubetto	Peso	Dimensioni			Velocità	Velocità media
/	g	mm	mm	mm	m/s	m/s
C1-20	8031	149	151	150	3605,77	3652,90
C2-20	8048	149	150	150	3676,47	
C3-20	8047	150	150	150	3676,47	
C4-200	7889	150	149	150	3125,00	3142,66
C5-200	7971	150	151	151	3125,00	
C6-200	7790	150	151	150	3177,97	
C7-300	7769	149	150	150	2929,62	2945,15
C8-300	7792	150	150	150	2976,19	
C9-300	7861	150	150	150	2929,64	
C10-400	7775	150	150	150	2060,44	2202,49
C11-400	7817	150	151	150	2314,88	
C12-400	7775	150	151	150	2232,14	
C13-500	7647	150	151	151	1442,31	1488,90
C14-500	7705	150	151	150	1524,39	
C15-500	7786	151	150	151	1500,00	
C16-600	4974*	150	150	150	/	912,64
C17-600	7738	150	150	150	976,56	
C18-600	7649	150	151	151	848,71	

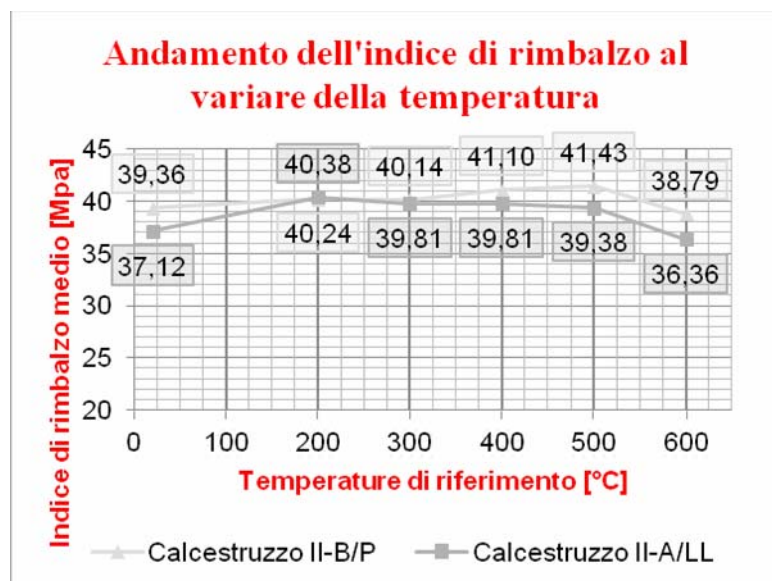
Tabella 5 - Calcolo della velocità Calcestruzzo al calcare

11.4. Calcolo dell'indice di rimbalzo, mediante prova sclerometrica, dopo il trattamento termico

Il calcolo dell'indice sclerometrico è un parametro non indicativo della resistenza del materiale in quanto fornisce solo informazioni sulle condizioni superficiali del calcestruzzo e non possono essere estese anche alla parte più interna.

Inoltre anche nel calcestruzzo, che ha subito il trattamento termico, la correlazione tra indice di rimbalzo e resistenza a compressione perde di affidabilità nel tempo a causa dell'indurimento superficiale del calcestruzzo.

Il grafico mostra per entrambe le tipologie di calcestruzzo un andamento dell'indice di rimbalzo medio moderatamente variabile fino alla temperatura di 500°C, dopodiché si assiste ad un decadimento di circa 5Mpa.



CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Calcolo dell'indice di rimbalzo mediante prova sclerometrica											
Sigla cubetto	Resistenza per ogni battuta									Valore medio	Valore medio
/	Mpa									Mpa	Mpa
P1-20	38	39	39	35	43	35	45	42	36	39,1	39,4
P2-20	38	30	39	40	41	37	41	39	46	39,3	
P3-20	39	39	40	41	37	38	41	41	40	39,7	
P4-200	40	39	45	40	37	39	47	39	40	40,3	40,2
P5-200	50	42	40	41	40	41	44	39	42	41,4	
P6-200	36	39	44	39	42	37	38	40	38	39,0	
P7-300	42	39	42	39	37	40	39	39	41	39,9	40,1
P8-300	40	39	41	40	40	42	38	39	43	40,1	
P9-300	40	40	39	40	40	41	41	41	41	40,4	
P10-400	42	44	42	42	42	40	40	41	43	41,7	41,1
P11-400	41	41	42	42	41	44	43	44	44	42,4	
P12-400	39	39	41	39	40	39	38	39	39	39,1	
P13-500	39	40	42	43	39	42	42	40	40	40,7	41,4
P14-500	42	41	41	42	43	40	41	41	41	41,3	
P15-500	42	43	42	42	43	43	44	40	41	42,3	
P16-600	40	39	37	38	39	40	41	40	40	39,4	38,8
P17-600	38	40	40	39	39	36	38	36	37	38,1	
P18-600	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	

Tabella 6 - Calcolo dell'indice di rimbalzo Calcestruzzo alla pozzolana

Calcolo dell'indice di rimbalzo mediante prova sclerometrica											
Sigla cubetto	Resistenza per ogni battuta									Valore medio	Valore medio
/	Mpa									Mpa	Mpa
C1-20	38	40	38	35	37	37	36	36	36	37,0	37,1
C2-20	35	36	40	39	42	36	35	36	35	36,9	
C3-20	36	38	37	37	36	36	40	40	38	37,5	
C4-200	42	44	39	48	39	40	40	39	36	40,4	40,4
C5-200	39	44	44	42	41	52	38	43	43	42,3	
C6-200	40	38	38	39	39	37	37	40	38	38,4	
C7-300	41	40	42	41	40	41	41	40	40	40,6	39,8
C8-300	40	38	39	41	39	40	42	39	39	39,6	
C9-300	38	39	39	41	40	40	38	40	39	39,3	
C10-400	39	41	41	41	38	39	41	37	41	40,0	39,8
C11-400	41	41	41	42	40	38	42	38	44	40,7	
C12-400	39	40	37	44	38	39	40	36	38	38,7	
C13-500	40	42	40	42	41	39	42	39	39	40,4	39,4
C14-500	42	42	39	41	38	38	41	38	38	39,6	
C15-500	36	38	34	40	39	38	37	39	41	38,1	
C16-600	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	36,4
C17-600	42	36	36	34	37	35	36	40	38	36,9	
C18-600	38	36	34	35	34	36	37	39	35	35,9	

Tabella 7 - Calcolo dell'indice di rimbalzo Calcestruzzo al Calcare

11.5. Calcolo della resistenza a compressione mediante prova di schiacciamento

Analizzando i risultati riportati nei grafici seguenti, si può notare un andamento analogo, della variazione della resistenza a compressione, per entrambi i tipi di calcestruzzo.

Il calcestruzzo alla pozzolana presenta una resistenza maggiore, anche se di $3 \div 5$ Mpa, per temperature comprese tra 20°C e 300°C mentre per le restanti temperature, superiori ai 300°C , le resistenze sono di poco superiori rispetto a quelle del calcestruzzo al Calcare (per $T=500^{\circ}\text{C}$ la resistenza è addirittura minore);

Il calcestruzzo al Calcare è caratterizzato da un andamento della resistenza a compressione simile di quello alla Pozzolana con la differenza che la pendenza di decadimento della resistenza è minore.

Confrontando i risultati delle due sperimentazioni, si evidenzia che il calcestruzzo al Calcare presenta, in linea di massima, una riduzione minore della resistenza a compressione (comportamento migliore) rispetto a quella del calcestruzzo alla Pozzolana;

Per temperature comprese tra 500°C e 600°C le due curve si sovrappongono;

Dato rilevante per entrambe le curve è la riduzione di resistenza a compressione a 600°C (pari a circa il 60%), il che può corrispondere, in un edificio interessato da incendio, ad un collasso strutturale degli elementi strutturali.

Dall'interazione delle osservazioni sui grafici possiamo dire che:

Per temperature comprese tra 20°C e 500°C il calcestruzzo alla Pozzolana presenta delle resistenze a compressione maggiori rispetto a quelle del calcestruzzo al Calcare, ma un decadimento delle prestazioni più accentuato.

Ciò significa che il calcestruzzo alla Pozzolana è per proprietà intrinseche migliore di quello al Calcare, ma di contro il calcestruzzo al Calcare

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

presenta un miglior comportamento nei confronti delle alte temperature.

Per temperature maggiori di 500°C il decadimento delle prestazioni è pressoché identico.

Ciò significa che l'andamento della resistenza a compressione non è più dominato dal decadimento del legante bensì dal decadimento degli aggregati in seguito a trasformazioni chimiche.

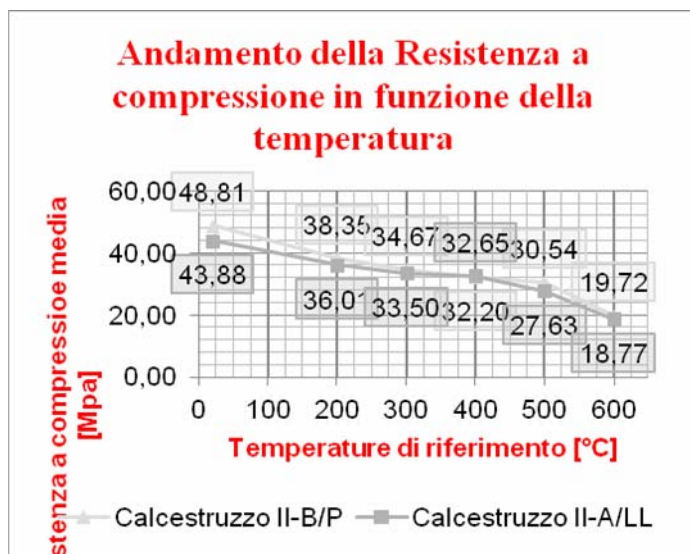


Figura 0-4 - Andamento della resistenza a compressione valutato mediante prova di schiacciamento

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

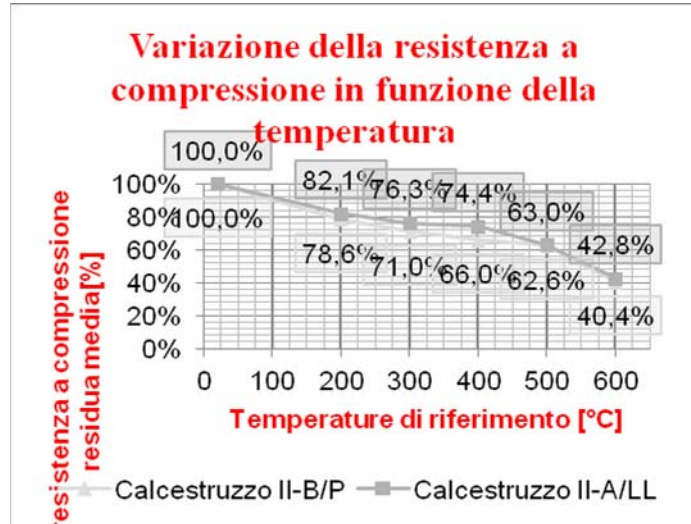


Fig. 8.10.II Figura

0-5 - Confronto in termini di resistenza a compressione

Calcolo della resistenza a compressione mediante prova di schiacciamento							
Sigla cubetto	Area nominale	Area effettiva	Fm	Tipo di rottura	Rc nom.	Rc real	Rc medio reale
/	mm2	mm2	kN	/	Mpa	Mpa	Mpa
P1-20	22500	22650	1073	Sodd.	47,7	47,4	48,81
P2-20	22500	22650	1084	Sodd.	48,2	47,8	
P3-20	22500	22350	1145	Sodd.	50,9	51,2	
P4-200	22500	22500	871	Sodd.	38,7	38,7	38,35
P5-200	22500	22500	862	Sodd.	38,3	38,3	
P6-200	22500	22650	862	Sodd.	38,3	38,1	
P7-300	22500	22650	789	Sodd.	35,1	34,8	34,67
P8-300	22500	22650	803	Sodd.	35,7	35,5	
P9-300	22500	22500	758	Sodd.	33,7	33,7	
P10-400	22500	22650	732	Sodd.	32,5	32,3	32,20
P11-400	22500	22500	767	Sodd.	34,1	34,1	
P12-400	22500	22650	684	Sodd.	30,4	30,2	
P13-500	22500	22500	706	Non Sodd.	31,4	31,4	30,54
P14-500	22500	22650	689	Sodd.	30,6	30,4	
P15-500	22500	22801	680	Non Sodd.	30,2	29,8	
P16-600	22500	22650	455	Non Sodd.	20,2	20,1	19,72
P17-600	22500	22500	435	Non Sodd.	19,3	19,3	
P18-600	22500	22650	/	/	/	/	

Tabella 8 - Calcolo della resistenza a compressione Calcestruzzo alla Pozzolana

Calcolo della resistenza a compressione mediante prova di schiacciamento							
Sigla cubetto	Area nominale	Area effettiva	Fm	Tipo di rottura	Rc nominale	Rc reale	Rc medio reale
/	mm2	mm2	kN	Sodd/Non Sodd.	Mpa	Mpa	Mpa
C1-20	22500	22499	979	Sodd.	43,5	43,5	43,9
C2-20	22500	22350	937	Sodd.	41,6	41,9	
C3-20	22500	22500	1040	Sodd.	46,2	46,2	
C4-200	22500	22350	804	Sodd.	35,7	36,0	36,0
C5-200	22500	22650	828	Sodd.	36,8	36,6	
C6-200	22500	22650	804	Sodd.	35,7	35,5	

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

C7-300	22500	22350	789	Sodd.	35,1	35,3	33,5
C8-300	22500	22500	750	Sodd.	33,4	33,4	
C9-300	22500	22500	717	Sodd.	31,9	31,9	
C10-400	22500	22500	759	Sodd.	33,7	33,7	32,6
C11-400	22500	22650	731	Sodd.	32,5	32,3	
C12-400	22500	22650	723	Sodd.	32,1	31,9	
C13-500	22500	22650	599	Sodd.	26,6	26,4	27,6
C14-500	22500	22650	712	Non Sodd.	31,7	31,4	
C15-500	22500	22650	566	Sodd.	25,2	25,0	
C16-600	22500	22500	/	/	/	/	18,8
C17-600	22500	22500	431	Non Sodd.	19,2	19,2	
C18-600	22500	22650	416	Non Sodd.	18,5	18,4	

Tabella 9 - Calcolo della resistenza a compressione Calcestruzzo al Calcare

11.6. Calcolo della resistenza a compressione mediante metodo SonReb

Dopo aver raccolto tutti i dati sperimentali si è proceduto con il calcolo della resistenza a compressione mediante il metodo SonReb.

Lo scopo della prova è calcolare la resistenza media a compressione del calcestruzzo combinando la velocità ultrasonica V , ottenuta con prove ultrasoniche, con l'indice di rimbalzo S ottenuto con prove sclerometriche, compensando gli errori di entrambe le prove.

A tal fine sono state utilizzate le formule di correlazione analitica di seguito riportate, attraverso il calcolo dei diversi coefficienti

$$\alpha_1 = \frac{R_{CUBO}}{7,695 \cdot 10^{(-10)} \cdot R_s^{1,4} \cdot v^{2,6}} \quad \text{RILEM 1993 NDT4}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_{CUBO}}{6.693 \cdot 10^{(-7)} \cdot R_s^{1,246} \cdot (v1)^{1,85}} \quad \text{J. GASPARIK 1992}$$

$$\alpha_3 = \frac{R_{CUBO}}{9.964 \cdot 10^{(-9)} \cdot R_s^{1,058} \cdot (v1)^{2,446}} \quad \text{DI LEO-PASCALE 1994}$$

Tali espressioni non sono altro che le formule inverse delle seguenti relazioni:

$$R_{cls1} = \alpha_1 \cdot 7,695 \cdot 10^{(-10)} \cdot R_s^{1,450} \cdot (v1)^{2,58} \quad (\text{RILEM 1993, NDT4})$$

$$R_{cls2} = \alpha_2 \cdot 6.693 \cdot 10^{(-7)} \cdot R_s^{1,246} \cdot (v1)^{1,85} \quad (\text{J. Gasparik 1992})$$

$$R_{cls3} = \alpha_3 \cdot 9.964 \cdot 10^{(-9)} \cdot R_s^{1,058} \cdot (v1)^{2,446} \quad (\text{Di Leo, Pascale 1994})$$

Calcolo dei coefficienti α									
$R_{e,cubo}$	R_{cls1}	R_{cls2}	R_{cls3}	α_1 R_e/R_{cls1}	α_2 R_e/R_{cls2}	α_3 R_e/R_{cls3}	α_1 medio	α_2 medio	α_3 medio
Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	/	/	/	/	/	/
47,4	274,2	273,7	279,4	0,173	0,173	0,170	0,182	0,181	0,179
47,8	249,3	255,9	254,8	0,192	0,187	0,188			
51,2	280,7	279,3	284,2	0,182	0,183	0,180			

Tabella 10 - Es. di calcolo sui provini P1-20, P2-20 e P3-20, dei coefficienti α

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Caratteristiche meccaniche mediante metodo Son-Reb						
R _{cls 1}	R _{cls 2}	R _{cls 3}	R _{cls medio}	R _{cls medio}	E _o	E _{o medio}
Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
50,01	49,58	50,06	49,88	48,87	29765,6	29002,7
45,46	46,36	45,66	45,83		27476,9	
51,21	50,60	50,93	50,91		29765,6	

Tabella 11 - Es. di calcolo sui provini P1-20, P2-20 e P3-20, delle caratteristiche meccaniche mediante Son-Reb

In cui :

$$E_o = \frac{Ed}{1.062} \quad E_d = \frac{(1 + \delta) \cdot (1 - 2\delta)}{(1 - \delta)} \cdot \gamma_{CLS} \cdot V_m^2$$

δ = Modulo di Poisson assunto pari a 0,2

γ_{cls} = Peso specifico del calcestruzzo (valore medio Fig. 8.5.I) assunto pari a 2399kg/m³

In seguito si riportano i calcoli effettuati tramite metodo Son-Reb di tutti i provini.

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Calcolo delle caratteristiche meccaniche mediante metodo Son-Reb							
Sigla	Rcls	Rcls	Rcls	Rcls medio	Rcls medio	Eo	Eo medio
	1	2	3			cls	cls
	MPa	MPa	MPa			MPa	MPa
P1-20	50,0	49,6	50,1	49,9	48,9	29765,6	29002,7
P2-20	45,5	46,4	45,7	45,8		27476,9	
P3-20	51,2	50,6	50,9	50,9		29765,6	
P4-200	35,4	38,9	35,7	36,7	37,1	21996,5	22260,8
P5-200	36,9	40,3	36,8	38,0		21996,7	
P6-200	35,3	38,6	36,0	36,7		22789,3	
P7-300	28,0	32,9	28,8	29,9	30,2	18591,9	18618,2
P8-300	27,2	32,2	27,9	29,1		18006,4	
P9-300	30,0	34,6	30,5	31,7		19256,4	
P10-400	9,7	15,5	10,4	11,9	13,5	7754,7	8931,1
P11-400	9,2	15,0	9,8	11,3		7291,8	
P12-400	15,1	21,0	16,1	17,4		11746,8	
P13-500	6,1	11,1	6,8	8,0	9,0	5596,9	6088,9
P14-500	8,2	13,7	8,8	10,2		6869,3	
P15-500	6,8	12,1	7,4	8,7		5800,5	
P16-600	2,1	5,1	2,4	3,2	2,8	2502,3	2241,0
P17-600	1,5	3,9	1,8	2,4		1979,7	
P18-600	/	/	/	/		/	

Tabella 12 - Calcolo delle caratteristiche meccaniche mediante Son-Reb

Calcolo delle caratteristiche meccaniche mediante metodo Son-Reb							
Sigla	Rcls	Rcls	Rcls	Rcls medio	Rcls medio	Eo	Eo medio
	1	2	3			cls	cls
	MPa	MPa	MPa			MPa	MPa
C1-20	42,2	42,7	42,4	42,4	43,9	26313,7	27008,4
C2-20	44,2	44,0	44,2	44,1		27355,7	
C3-20	45,3	45,0	45,1	45,1		27355,7	
C4-200	33,2	36,6	32,8	34,2	34,6	19764,5	19989,7
C5-200	35,4	38,7	34,4	36,2		19764,5	
C6-200	32,2	35,4	32,4	33,3		20440,2	
C7-300	28,3	32,6	28,1	29,6	29,3	17370,3	17556,0
C8-300	28,4	32,5	28,4	29,8		17927,0	
C9-300	27,0	31,3	27,2	28,5		17370,6	
C10-400	11,2	16,7	11,7	13,2	15,3	8592,2	9840,5
C11-400	15,5	21,2	15,9	17,5		10845,3	
C12-400	13,1	18,6	13,8	15,1		10083,9	
C13-500	4,5	8,7	4,9	6,1	6,3	4210,2	4489,0
C14-500	5,1	9,4	5,5	6,7		4703,0	
C15-500	4,6	8,7	5,1	6,2		4553,7	
C16-600	/	/	/	/	2,0	/	1694,0
C17-600	1,4	3,8	1,7	2,3		1930,1	
C18-600	1,0	2,8	1,2	1,7		1457,8	

Tabella 13 - Calcolo delle caratteristiche meccaniche mediante Son-Reb

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Come già analizzato precedentemente il metodo Son-Reb combina i risultati dalla prova sclerometrica e dalla prova ad ultrasuoni e mediante una serie di calcoli iterativi fornisce il valore della resistenza a compressione.

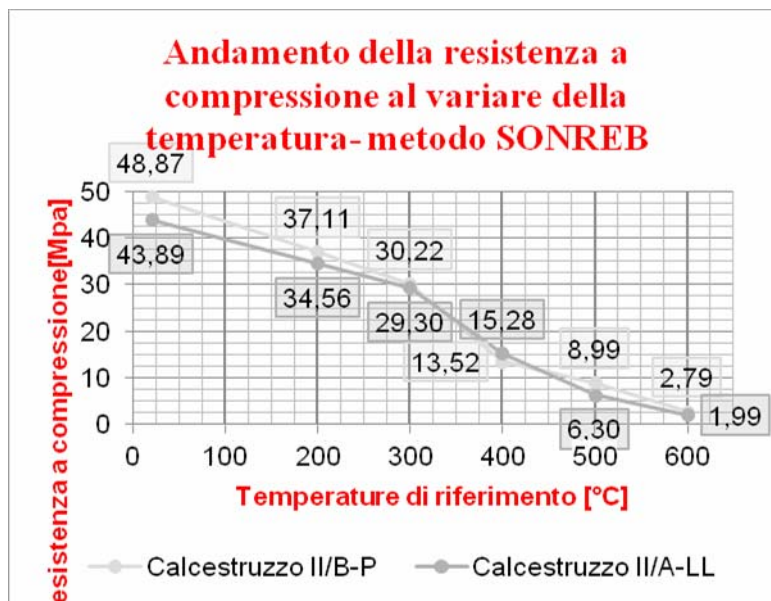


Fig. 8.11.I

Figura 0-6 - Andamento della resistenza a compressione – Metodo Son-Reb

Anche dalla lettura del grafico di sopra, salta subito all'occhio il decadimento della resistenza a compressione all'aumentare della temperatura.

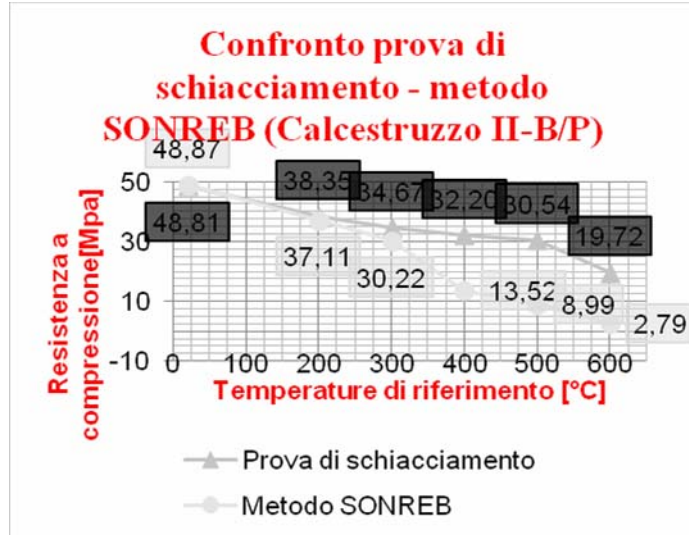


Figura 0-7 - Confronto Resistenze a compressione (Calcestruzzo alla Pozzolana)

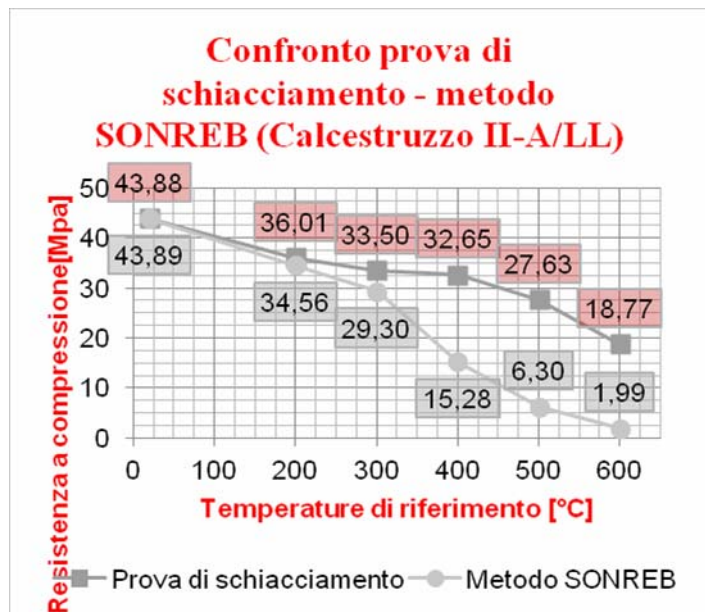


Figura 0-8 - Confronto Resistenze a compressione (Calcestruzzo al Calcare)

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Da un confronto tra gli andamenti della resistenza a compressione, calcolata mediante metodo Son-Reb e le resistenze a compressione medie valutate mediante prova di schiacciamento, si possono notare due diversi andamenti:

Da 20°C a 300°C i valori della resistenza a compressione calcolati mediante metodo Son-Reb sono prossimi a quelli reali (valutati mediante prova di schiacciamento);

Da 300°C a 600°C i valori della resistenza a compressione calcolati mediante metodo Son-Reb sono molto al di sotto rispetto a quelli reali (valutati mediante prova di schiacciamento).

Dalle valutazioni sopra riportate possiamo dire che i valori di resistenza a compressione calcolati mediante metodo Son-Reb non rispecchiano il reale andamento della resistenza a compressione reale nei casi in cui la struttura sarà investita da un incendio significativo ($T > 300^{\circ}\text{C}$).

Il limite di tale metodologia risiede nella sua “taratura”, cioè nel calcolo del parametro α in riferimento ai campioni non sottoposti a trattamento termico (valori della velocità di circa 3700m/s).

Dal confronto si evince che applicando le formulazioni “classiche” si giunge a risultati dotati di una buona affidabilità esclusivamente per valori della velocità maggiori di 3000 m/s, mentre i risultati si disperdono per valori della velocità più bassi. Il confronto fra i due grafici porta inoltre ad asserire che l'errore percentuale che le formule considerate commettono nel prevedere la resistenza sperimentale risulta maggiore per i calcestruzzi in cui la velocità varia sensibilmente rispetto al valore di taratura

E' necessario comunque sottolineare che i valori della resistenza a compressione calcolati mediante metodo Son-Reb sono di gran lunga inferiori e non superiori alla resistenza a compressione reale (metodo conservativo).

Tali risultati trovano riscontro anche in una sperimentazione precedente (Confronto teorico-sperimentale per il calcolo della resistenza in situ dei calcestruzzi: primi risultati - T. De Lucia, M. Miranda, A. Basile, A. Formisano)

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

La sperimentazione è stata applicata considerando sei prove distruttive su calcestruzzi appartenenti a due differenti strutture, una edificata negli anni '60 e l'altra negli anni '90.

Tabella 1: Prove in situ su calcestruzzo appartenente ad un edificio degli anni '60

N.	I	V (m/sec)	Rreale (MPa)	\uparrow_A	\uparrow_B	\uparrow_C	Rcls _A	Rcls _B	Rcls _C	Rcls medio	\uparrow_A	\uparrow_B	\uparrow_C	\uparrow
1	33,00	1938	7,42	0,200	0,118	0,168	6,52	8,08	6,95	7,18	-12,09%	9,01%	-6,33%	-3,14%
2	32,60	2354	11,13	0,185	0,125	0,158	10,57	11,40	11,03	11,00	-4,96%	2,50%	-0,89%	-1,12%
3	40,20	2431	14,75	0,166	0,120	0,155	15,56	15,71	14,89	15,39	5,52%	6,53%	0,95%	4,33%
4	37,40	2597	15,95	0,169	0,126	0,154	16,62	16,23	16,21	16,35	4,18%	1,72%	1,63%	2,51%
5	36,20	3008	21,56	0,163	0,135	0,151	23,17	20,45	22,44	22,02	7,43%	-5,15%	4,07%	2,12%
6	34,20	3172	23,77	0,171	0,145	0,155	24,47	21,02	24,06	23,18	2,91%	-11,56%	1,22%	-2,48%
media														0,37%
scarto quadratico medio														2,77%

Tabella 2: Prove in situ su calcestruzzo appartenente ad un edificio degli anni '90

N.	I	V (m/sec)	Rreale (MPa)	$\&_A$	$\&_B$	$\&_C$	Rcls _A	Rcls _B	Rcls _C	Rcls medio	$\&_A$	$\&_B$	$\&_C$	$\&$
1	39,20	3824	30,73	0,112	0,112	0,110	31,85	32,37	30,66	31,63	3,64%	5,35%	-0,21%	2,93%
2	34,01	3927	28,35	0,118	0,117	0,110	27,75	28,49	28,15	28,13	-2,11%	0,47%	-0,71%	-0,78%
3	34,80	4069	30,40	0,112	0,115	0,106	31,44	31,30	31,46	31,40	3,44%	2,96%	3,49%	3,30%
4	33,99	4081	30,42	0,115	0,117	0,108	30,62	30,56	30,91	30,70	0,65%	0,45%	1,59%	0,90%
5	34,20	4104	31,58	0,117	0,120	0,110	31,35	31,12	31,54	31,34	-0,73%	-1,46%	-0,12%	-0,77%
6	33,80	4227	34,79	0,121	0,127	0,114	33,26	32,39	33,49	33,05	-4,39%	-6,89%	-3,74%	-5,01%
media														0,09%
scarto quadratico medio														2,78%

Dal confronto dei risultati in termini di errore derivante dal confronto di resistenza teorico-sperimentale

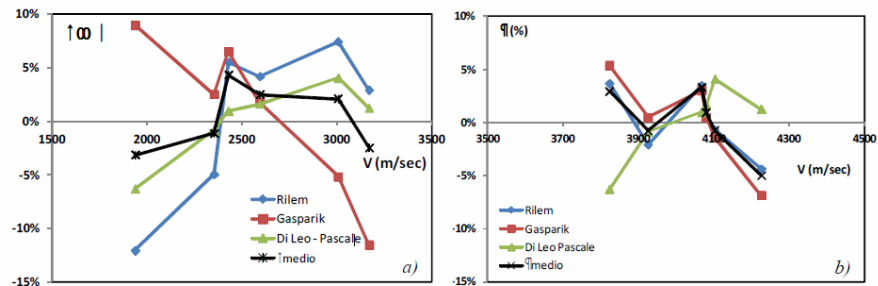


Figura 0-9 - Confronto di resistenza teorico-sperimentale su cls di edifici realizzati negli anni '60(a) e '90(b)

si evince che, per cls di strutture anni '60, applicando le formulazioni "classiche" si giunge a risultati dotati di una buona affidabilità esclusivamente nella parte centrale del range di valori della velocità (1900 - 3200 m/sec), mentre i risultati si disperdono per valori della velocità molto alti o molto bassi.

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Invece, per cls di strutture anni '90, i valori relativi alla velocità ultrasonica sono contenuti in range piuttosto ridotti (3800 - 4300 m/sec) ed applicando le formulazioni “classiche” si giunge a risultati dotati di una buona affidabilità.

In conclusione possiamo affermare che il metodo Sonreb fornisce:

Valori della resistenza a compressione simili a quelli reali per valori della velocità prossimi alla velocità di taratura;

Valori della resistenza a compressioni sottostimati rispetto a quelli reali per valori della velocità molto minori rispetto alla velocità di taratura.

Nel momento in cui il tecnico incaricato è chiamato a rilevare le caratteristiche meccaniche di un edificio oggetto di incendio si troverà “apparentemente” di fronte valori delle resistenze irreali. Quindi tale metodo, per velocità molto minori rispetto a quelle di taratura, non fornisce informazioni quantitative attendibili delle resistenze meccaniche residue ma qualitativamente lascia presagire ad un notevole decadimento prestazionale.

11.7. Valutazione del degrado attraverso decomposizione chimica

Per effettuare una valutazione del degrado attraverso decomposizione chimica del calcestruzzo sono stati sottoposti ad analisi termogravimetrica 4 campioni:

1. Aggregato naturale calcareo 10/20 (Cava sita il Salza Irpinia, Avellino);
2. Cemento Portland al Calcare (CEM II/A-LL 42.5);
3. Calcestruzzo con Portland alla Pozzolana (CEM II/B-P 42.5);
4. Calcestruzzo con Portland al Calcare (CEM II/A-LL 42.5).

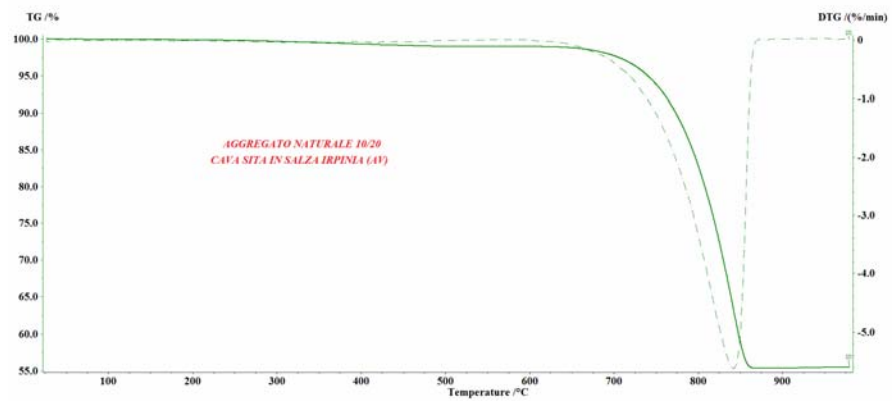
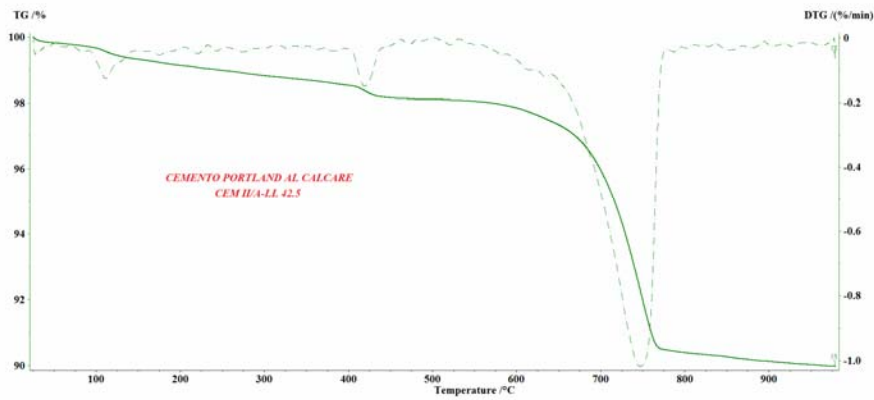


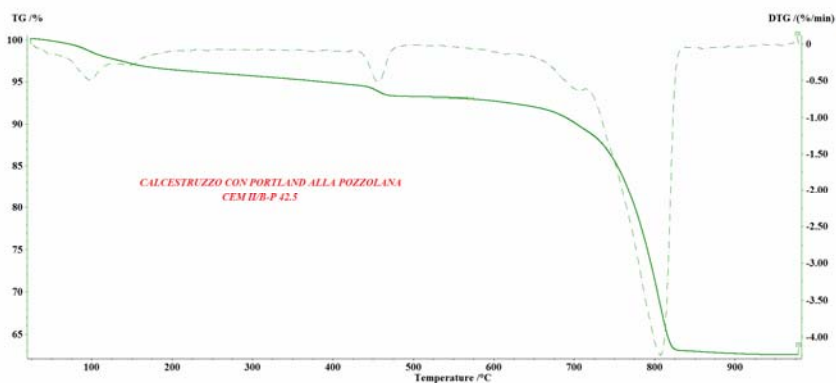
Figura 0-10 - Analisi termogravimetrica di un campione di aggregato calcareo

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI



Fi

gura 0-11 Analisi termogravimetrica di un campione di CEM II/A-LL



Fig

Figura 0-12 - Analisi termogravimetrica di un campione di calcestruzzo con CEM II/B-P

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

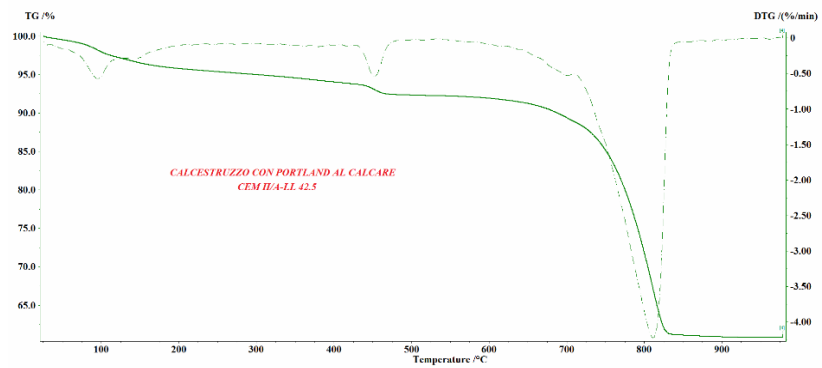


Fig.
Figura 0-13 - Analisi termogravimetrica di un campione di calcestruzzo con CEM II/A-LL

Dall' analisi termogravimetrica sul campione di aggregato impiegato nel confezionamento dei provini di calcestruzzo

si tratta di Calcare puro che si decompone, a partire da 700°C, da Carbonato di Calcio a Ossido di Calcio liberando una molecola di anidride carbonica, secondo la reazione seguente:



La decomposizione si completa a circa 850°C.

Dall' analisi termogravimetrica sul campione di cemento tal quale con Portland al Calcare CEM II/A-LL possiamo individuare due fasi:

Tra 25 e 600°C

La perdita di peso del 2% è attribuibile alla decomposizione del gesso (regolatore della presa).

La quantità di gesso è di circa il 9%.

Tra 600 e 750°C

La perdita di peso del 7% è attribuibile alla decomposizione del carbonato di calcio. (aggiunta calcearea).

La quantità di calcare è di circa il 16%.

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

Dall' analisi termogravimetrica (frazioni fini, passante a $63\mu\text{m}$) sui campioni di calcestruzzo è evidente che le curve dei due campioni sono perfettamente sovrapponibili, il che lascia escludere un'influenza diretta delle aggiunte (Calcare o Pozzolana) a temperature inferiori a quella di decomposizione del carbonato di calcio ($> 700^\circ\text{C}$). Possiamo individuare 2 fasi:

Tra 25 e 700°C

La perdita di peso è attribuibile alla progressiva decomposizione delle fasi idrauliche (silicati idrati di calcio) responsabili delle proprietà meccaniche della fase legante del calcestruzzo.

Tra 700 e 850°C

La perdita di peso è invece causata dalla decomposizione dell'aggregato calcareo.

Dall'interazione dei grafici riportati possiamo trarre una serie di osservazioni:

Fino a circa 600° il comportamento meccanico del calcestruzzo, in relazione alle sollecitazioni termiche, dipende dalla frazione legante (cemento idratato) che si decompone, sempre più intensamente, a partire da temperature relativamente basse (circa 200°C).

A temperature superiori a 700°C è da prevedere l'effetto della decomposizione del calcare, sia quello di aggiunta al cemento sia quello sotto forma di aggregato del calcestruzzo.

11.8. CONCLUSIONI

In relazione ai risultati sperimentali ottenuti, basati su una valutazione comparativa che ha interessato elementi in calcestruzzo privi di armature, e quindi trascurando le differenti dilatazioni termiche tra calcestruzzo e acciaio, che portano ad effetti ben più evidenti del decadimento delle prestazioni del calcestruzzo, si può dedurre che all'aumentare della

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

temperatura; la resistenza meccanica residua è minore del 50% rispetto a quella iniziale.

Inoltre, a partire da 200°C fino a 600°C, vi è una importante decomposizione della frazione legante (cemento idratato) che si decompone sempre più intensamente; per temperature superiori a 700°C è da prevedere l'effetto della decomposizione del calcare, sia quello di aggiunta al cemento sia quello sotto forma di aggregato del calcestruzzo.

In ultimo il fenomeno dello spalling esplosivo ha conseguenze ben più devastanti del semplice decadimento delle caratteristiche meccaniche in quanto, contestualizzato in un elemento strutturale, il distacco di una parte comporta una riduzione di area resistenza con conseguente incremento di tensioni nella parte residua; Tale diminuzione di area resistente associata al decadimento della resistenza a compressione può decretare il collasso strutturale dell'elemento.

Analizzando nella sua globalità un incendio, focalizzando l'attenzione sulle alte temperature raggiunte sugli elementi strutturali, non ha più senso parlare di resistenze meccaniche residue se si verifica un'esplosione con conseguente riduzione di area resistente.

In caso di incendio, per strutture massive (elevati gradienti termici) e per calcestruzzi ad alte prestazioni (basse porosità) il fenomeno dello spacco esplosivo ha conseguenze più devastanti del decadimento delle stesse resistenze meccaniche.

Alla luce di tutto ciò, appare davvero difficile una analisi globale dell'edificio, esposto alle temperature tipiche dell'incendio, che ne possa permettere con attendibilità il ripristino delle condizioni imposte dalla normativa.

In una corretta analisi costi-benefici è indispensabile ipotizzare l'alternativa della demolizione, sempre che tale aspetto possa essere ammortizzato da ricavi economici derivanti dal riutilizzo del calcestruzzo e altre parti dell'edificio.

Nella costruzione di opere di Genio Civile come strade, ferrovie, piazzali portuali e interportuali, nelle quali sono generalmente più elevate le quantità di materiali inerti da impiegare per nuove realizzazioni o da smaltire, è sicuramente vantaggioso prevedere il riciclaggio e il riuso delle

CAPITOLO 11 - RISULTATI E CONCLUSIONI

materie di risulta da attività di demolizione e costruzione. Il riuso dei materiali inerti riciclati come materie prime seconde è suggerito da diverse esigenze connesse a tematiche ambientali e economiche tra le quali:

Da tempo sono state sperimentate, sia in laboratorio sia in sito, le buone qualità dei materiali inerti recuperati, e le tecniche di trattamento e di riciclaggio di tale tipologia di materiali consentono di ottenere aggregati con caratteristiche prestazionali paragonabili a quelle dei tradizionali inerti naturali.

Tuttavia la diffusione dell'utilizzo ed anche la produzione su larga scala dei derivati dal riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione è ancora ridotta per diversi motivi, tra questi può annoverarsi anche l'assenza o la carenza di specifici strumenti tecnici (Capitolati Speciali d'Appalto) e normativi.

In molte regioni italiane, tra cui la Toscana, sono stati redatti e approvati Capitolati Speciali d'Appalto.

In essi la parte di materiale riciclato è obbligatoriamente presente e le curve granulometriche a cui devono rispondere i materiali inerti in accettazione, ben si sposano con quelle provenienti dai materiali da costruzione provenienti da demolizione.

BIBLIOGRAFIA

- Maurizio Nicolella – Programma del corso di Manutenzione Programmata
- Pietro Natale Maggi, Bruno Daniotti, Giuseppe Alaimo, Angelo Ciribini, Luigi Morra, Maurizio Nicolella, Umberto Rodonò – La durabilità dei componenti edilizi
- UNI 11156 – Valutazione della durabilità dei componenti edilizi
- Mario Collepari – Durabilità del calcestruzzo: Cause di degrado di tipo chimico
- Luigi Coppola – Durabilità del calcestruzzo: Cause di degrado di tipo fisico e meccanico
- Flavia Fascia, Renato Iovino – La struttura in cemento armato per l'architettura
- Sergio Tattoni – Metodi di indagine sulle strutture
- Edoardo Cosenza, Gaetano Manfredi, Marisa Pecce – Strutture in cemento Armato
- Mario Collepari, Michele Valente – Effetto delle alte temperature sulle proprietà dei calcestruzzi
- Gianna Pisaneschi – Tesi di laurea in materiali innovativi e riabilitazione strutturale: Comportamento al fuoco di elementi strutturali con rinforzi applicati esternamente
- Davide Scianlepore, Alessandro Simonini – Tesi di laurea magistrale: Il fenomeno dello spacco esplosivo del calcestruzzo esposto al fuoco

Bibliografia

- Mario Collepari – Comportamento al fuoco delle strutture in cemento armato
- Stefano Citterio – Tesi di laurea magistrale: Il danneggiamento di calcestruzzo architettonico bianco ad alte temperature
- INAIL – Formazione Antincendio
- Enco Journal – “C” come Cemento
- Enco Journal – “H” come Hydration
- Giuseppe Cefarelli – Tesi di dottorato: Analisi Teorico-Sperimentale di solette in calcestruzzo armato con barre di FRP soggette ad incendio
- <http://www.las.provincia.venezia.it> – I cementi
- Emidio Nigro – Il progetto delle strutture in caso di incendio
- Fabrizio Finuoli – Seminario informativo sull’evoluzione della normativa antincendio
- UNI 12390-1,2,3,4,5,6,7,8 – Prova sul calcestruzzo indurito
- UNI EN 12504-2,4 - Prove sul calcestruzzo nelle strutture
- Mapei – Il degrado del calcestruzzo
- T. De Lucia, M. Miranda, A. Basile, A. Formisano - Confronto teorico-sperimentale per il calcolo della resistenza in situ dei calcestruzzi
- Norme Tecniche per le Costruzioni 14 Gennaio 2008 (NTC-08)
- Apostolo F., “Il ciclo di vita della strada”, Le strade, 7-8-2007.
- Apostolo F., “Sulla strada dell’Intermat 2009”, Le strade, n. 3, 2009.

Bibliografia

- Baldi D., Polesi P., “Gestione dei rifiuti. La corretta attribuzione del codice CER”,2006.
- Bocci M., “Tecniche di stabilizzazione e riciclaggio a freddo”, Cold Recycling2007.
- Bocci M., Grilli A., Riviera P., Tolentino F., Paglione S., “Il riciclaggio a freddo per l’ampliamento alla terza corsia dell’autostrada A 14”, Strade & Autostrade, n. 6,2008.
- Bonola M., “Il riciclaggio come strumento di gestione della manutenzione”, Le strade, n. 5, 2005.
- Bonola M., Foschi R., “Riciclaggio in situ di pavimentazioni drenanti: primi risultati”, Le strade, n. 4, 2004.
- Bressi G., “Rifiuti inerti: dalla circolare n. 5205/2005 nuove prospettive per il riciclaggio”, Ambiente & Sicurezza - Il sole 24ORE, n. 21, 1 Novembre 2005.
- Bressi G., Micco S., “La produzione di aggregati riciclati in Italia”, Anpar,Novembre 2007.
- Bressi G., Pagani L., “La Marcatura CE degli aggregati riciclati. Gli aggregati riciclati - Riciclare per l’ambiente”, Pisa 2004.
- Capitolato Speciale di Appalto Regione Toscana